

CIENCIAS EXACTAS - #8

REVISTA

DE LAS JORNADAS DE
JÓVENES INVESTIGADORES

LA EDUCACIÓN Y LA CIENCIA
TRANSFORMAN REALIDADES



Asociación de Universidades
GRUPO MONTEVIDEO



UNIVERSIDAD
NACIONAL ✦
DE TUCUMÁN

Revista de las Jornadas de Jóvenes Investigadores
Eje Ciencias Exactas, Volúmen 8.

© 2025, Asociación de Universidades del Grupo Montevideo.

ISSN 3121-2182

Tucumán, Argentina. Noviembre de 2025.



Asociación de Universidades
GRUPO MONTEVIDEO



UNIVERSIDAD
NACIONAL ✦
DE TUCUMÁN

Contenido

Cosmic Inflation Via Weierstraß Elliptic Functions.....	5
<i>José Francisco Gallardo</i>	
Implementación de Homogeneización Mori-Tanaka Multi-Step en Hormigones Permeables....	16
<i>Oscar Martínez-Mejías</i>	
Extracción de celulosa a partir de biomasa residual de cepas locales de Cannabis medicinal.....	28
<i>Sebastián Dakak</i>	
Biolixiviación de metales pesados en sedimentos del río Reconquista.....	37
<i>Ana Tufo</i>	
Puesta a punto de una torre de enfriamiento con fines didácticos e investigación.....	55
<i>Ornella Chaperón</i>	
Más allá de lo convencional: Proteínas de camarones de la cuenca del Paraná y su potencial en la prevención de la obesidad y dislipidemia.....	63
<i>Sara Stechina</i>	
Análisis de la concentración de material particulado atmosférico sedimentable en la ciudad de Coronel Bogado, Itapúa, Paraguay.....	72
<i>María Luján Alonso</i>	
Efecto inhibitorio in vitro del extracto acuoso e hidroalcohólico de <i>Matricaria chamomilla L.</i> en cepas patrones.....	98
<i>Nicolás Ávalos</i>	
Software de propuesta de cimentaciones no superficiales basado en la resistencia del suelo obtenida del Standard Penetration Test (SPT).....	107
<i>Marcela Velázquez</i>	
Patrones de comportamiento entre condiciones climáticas y la producción de soja en el Departamento Alto Paraná.....	117
<i>Shyrley Cáceres</i>	
Análisis del modelo probabilístico de Lee Carter para realizar proyecciones de mortalidad....	131
<i>Eimi Reartes</i>	

El uso de inteligencia artificial (IA) como recurso de Investigación de los alumnos en la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas de la Universidad Nacional de Concepción, Paraguay.....	149
<i>Nicolás Avalos Denis</i>	
Comparativa de algoritmos de cifrado simétrico aplicados a imágenes.....	162
<i>Pablo Origlia</i>	
Uso de partículas de caucho reciclado en la estabilización de suelos para mitigar el impacto ambiental y reducir costos estructurales.....	177
<i>Jonatan Poma</i>	
Calibración de un modelo electroquímico para baterías de segunda vida.....	192
<i>Facundo Rivoir-Engelhardt</i>	
Efecto de la estacionalidad en la actividad antifúngica del aceite esencial de <i>Mentha suaveolens</i> sobre <i>Candida albicans</i> a través de un enfoque interdisciplinario.....	205
<i>Rocío Bustos-Izquierdo</i>	

27. Ciencia, tecnología e innovación

Cosmic Inflation Via Weierstraß Elliptic Functions

Autor: Gallardo Lobos, José Francisco; jose.gallardolo@estudiantes.uv.cl

Orientador/a: Villanueva Lobos, José Ricardo; jose.villanueva@uv.cl

Universidad de Valparaíso, Facultad de Ciencias, Instituto de Física y Astronomía

Resumen

En esta investigación se desarrolló un modelo inflacionario basado en un campo escalar y funciones elípticas de Jacobi y de Weierstraß, utilizando el formalismo Hamilton-Jacobi. El modelo permite derivar soluciones analíticas y numéricas que describen de manera consistente la dinámica del inflatón y la expansión del universo durante la inflación. Se observa que el potencial propuesto presenta regiones planas que sostienen una expansión acelerada prolongada, mientras que caídas abruptas en el potencial intensifican temporalmente dicha expansión. El factor de escala y el parámetro de Hubble reflejan la evolución temporal esperada: la expansión se mantiene casi constante en las regiones planas del potencial y se intensifica cuando el campo escalar tiende a valores donde el potencial crece. En esta fase de la investigación aún falta definir otras cantidades que caracterizan la inflación, pero la obtención de estos está contemplada dentro de los planes de trabajo futuro.

Palabras clave: Cosmología, Inflación, Weierstraß

Introducción

La teoría de la inflación surge como una extensión del modelo del Big Bang, capaz de resolver problemas conceptuales como la planitud, el horizonte y la existencia de monopolos magnéticos entre otros (Guth, 1981; Albrecht & Steinhardt, 1982; Linde, 1982).

En este marco, el universo experimenta un período de expansión acelerada, durante el cual las fluctuaciones cuánticas del campo inflatón se amplifican y se congelan como perturbaciones de densidad. Estas dejaron su huella en el CMB y constituyen las semillas a partir de las cuales se formaron las estructuras cósmicas observadas hoy (Mukhanov, Feldman, & Brandenberger, 1992; Liddle, 2000).

A partir de esto, los modelos de inflación pueden ser contrastados con observaciones de la radiación cósmica de fondo realizadas por misiones satelitales como WMAP y Planck (Hinshaw et al., 2013; Aghanim et al., 2020; Akrami et al., 2020), que permiten restringir con gran precisión los parámetros cosmológicos y las características del espectro primordial de perturbaciones.

La expansión acelerada del universo durante la inflación requiere un tipo de materia con presión negativa, la cual puede modelarse mediante un campo escalar denominado inflatón (Liddle & Lyth, 2000).

El inflatón es auto interactuante a través de un potencial $V(\phi)$, además se comporta como un fluido perfecto, con densidad de energía $\rho_\phi = \dot{\phi}^2/2 + V(\phi)$ y presión dadas por: $p_\phi = \dot{\phi}^2/2 - V(\phi)$, lo que muestra que, cuando domina la energía potencial $V(\phi)$ la presión se vuelve negativa y se satisface la condición necesaria para la inflación.

En este contexto, la elección de potenciales puede complicar considerablemente los cálculos, por lo que se suelen utilizar aproximaciones como la de slow-roll (Liddle et al., 1994). Este método asume que el término cinético es mucho menor que la energía potencial, $\dot{\phi}^2 \ll V(\phi)$, lo que permite simplificar las ecuaciones y obtener predicciones observacionales de manera más directa.

El formalismo de Hamilton–Jacobi constituye una herramienta poderosa y comúnmente usada para obtener soluciones exactas en inflación, sin necesidad de recurrir a la aproximación de slow-roll (Salopek & Bond, 1990).

A partir de la función de Hubble $H(\phi)$ es posible reconstruir directamente el potencial inflacionario $V(\phi)$ y describir la evolución del campo escalar.

En este trabajo se exploran nuevas soluciones exactas para un campo inflatón a partir de un potencial diseñado de manera que las ecuaciones puedan resolverse en términos de funciones de

Weierstraß y funciones elípticas de Jacobi. Este tipo de técnicas, ampliamente utilizadas en la literatura para abordar problemas no lineales, proporciona un marco sólido para el estudio de modelos de inflación de un solo campo (del Campo, 2012, 2013; Villanueva & Gallo, 2015).

La elección de este tipo de potenciales se justifica por la gran libertad que existe para definirlos en modelos de inflación.

Además, estas funciones elípticas presentan una naturaleza periódica, lo que permite explorar la posibilidad de establecer un límite natural para el final de la inflación.

Objetivos

El objetivo de esta investigación es desarrollar un modelo inflacionario en términos de funciones elípticas de Jacobi y de Weierstraß para un campo escalar denominado inflatón, utilizando el método de Hamilton–Jacobi como marco para estudiar la dinámica de la inflación.

Se busca proponer un potencial que permita obtener soluciones exactas en términos de funciones elípticas.

Derivar un conjunto de ecuaciones que satisfacen las condiciones necesarias para un régimen inflacionario.

Analizar el comportamiento dinámico del inflatón, del parámetro de Hubble y del

factor de escala a partir de dichas soluciones.

Se busca restringir el modelo mediante la comparación con datos observacionales de misiones como Planck y WMAP, tarea pendiente a realizar en etapas futuras de la investigación.

Materiales y Métodos

En esta sección se describe el formalismo de Hamilton-Jacobi aplicado a un campo escalar inflatón ϕ el cual gobierna la etapa inflacionaria. Se utilizarán unidades naturales donde $\hbar=c=1$ estas ecuaciones están dadas por

$$H^2 = \kappa \left(\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \right) \quad (1)$$

$$\left(\kappa = \frac{8\pi}{3 m_p^2} \right) \quad (2)$$

Donde m_p^2 es la masa de Plank y está dada por, $1/G$. Con G la constante de gravitación universal, además se requiere la ecuación de Klein-Gordon

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V'(\phi) = 0 \quad (3)$$

donde el punto significa la derivada con respecto al tiempo cósmico t , y $V'(\phi)$ indica la derivada con respecto al campo escalar inflatón ϕ .

Al derivar respecto al tiempo la ecuación (1) se obtiene

$$2H\dot{H} = \kappa \dot{\phi} \left(\ddot{\phi} + V'(\phi) \right) \quad (4)$$

Por lo tanto reemplazando la ecuación (3) en (4) obtenemos

$$\phi^2 = -\frac{2}{3\kappa} \dot{H} \quad (5)$$

Considerando la relación entre operadores por regla de la cadena se obtiene

$$\frac{d}{dt} = \phi \frac{d}{d\phi} \quad (6)$$

Por lo que la ecuación (5) se puede reescribir como

$$\phi = -\frac{2}{3\kappa} H' \quad (7)$$

Asumiendo que el parámetro de Hubble es invertible se puede escribir el potencial en función de H, por lo tanto, reemplazando la ecuación (7) en (1), se obtiene la ecuación de cinemática que involucra la evolución del campo escalar ϕ

$$\left(\frac{dH}{d\psi}\right)^2 = H^2 - \kappa V(H) \quad (8)$$

Donde se hizo del cambio a una variable adimensional $\psi = \sqrt{9\kappa/2} \phi$, Dado que el inflatón es un campo escalar real, se debe imponer la condición $H^2 > \kappa V$ durante la inflación.

Considerando la relación entre el parámetro de Hubble H y el factor de escala a, dado por

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 \quad (9)$$

Usando la ecuación (9) y (7), además considerando la relación entre operadores dada por (6), se obtiene

$$aH = -\frac{2}{3\kappa} a' H' \quad (10)$$

Resolviendo esta ecuación (10) para el factor de escala se encuentra

$$a(\phi) = a(\phi_i) \exp\left(-\frac{2}{3\kappa} \int \frac{H}{H'} d\phi\right) \quad (11)$$

Donde $a(\phi_i)$ está dado por el valor de ϕ que inicia la inflación, posteriormente se utilizaran los subíndices i y f para definir las cantidades que dan inicio y termino a la inflación. Asumiendo que se conoce la dependencia entre ϕ y t se puede obtener el factor de escala $a(t)$ en términos del tiempo cosmológico.

Particularmente la ecuación de aceleración toma la forma:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = H^2(1 - \epsilon_H) \quad (12)$$

Donde ϵ_H es el primer parámetro de jerarquía de Hubble y se define como

$$\epsilon_H \equiv -\frac{d \ln H}{d \ln a} = \frac{3\kappa}{2} \left(\frac{H'}{H}\right)^2 \quad (13)$$

La ecuación anterior entrega información acerca de la expansión del universo, particularmente, para que la inflación ocurra el parámetro ϵ_H debe satisfacer la condición $\epsilon_H < 1$; además define cuando la inflación termina y ocurre cuando toma el valor de 1.

Otra cantidad clave utilizada para describir la inflación es la cantidad de inflación, la cual se expresa mediante el número de e-foldings durante la expansión. se define como:

$$N(t) \equiv \ln\left(\frac{a_f}{a_i}\right) \quad (14)$$

Esta ecuación usualmente está gobernada por la razón del factor de escala respecto el tiempo final y el tiempo inicial. Al usar las ecuaciones (7), (11) y (13), se puede reescribir la ecuación anterior como:

$$N = \int_{t_i}^{t_f} H dt = \left(\frac{2}{3\kappa}\right) \int_{\phi_i}^{\phi_f} \frac{H}{H'} d\phi \quad (15)$$

Con este formalismo, se dispone de todas las herramientas necesarias para calcular el comportamiento dinámico del inflatón, del parámetro de Hubble y del factor de escala, así como para determinar los intervalos de campo escalar donde ocurre la inflación. El cálculo del número de e-folds N parámetro clave para cuantificar la expansión durante la fase inflacionaria.

Por otro lado, para obtener una solución exacta a la ecuación (8) se propone el siguiente potencial:

$$V(H) = V_0 - \frac{4}{\kappa} H^3 \quad (16)$$

Esta elección se justifica porque, al insertar este potencial en la ecuación (8), ésta se transforma en una integral que puede resolverse utilizando la definición de la integral de Weierstraß.

De esta manera, el modelo permite obtener soluciones analíticas en términos de funciones elípticas, manteniendo consistencia con las condiciones necesarias para la inflación.

Resultados y Discusión

En esta sección se trabaja con el potencial definido en la ecuación (16), el cual depende del cubo del parámetro de Hubble. Al sustituir este potencial en la ecuación (8), se obtiene

$$\left(\frac{dH}{d\psi}\right)^2 = 4H^3 + H^2 - \kappa V_0 \quad (17)$$

Por lo tanto, al realizar el cambio de variable $u = H + 1/12$ en la ecuación anterior, esta puede reescribirse de la siguiente manera

$$\left(\frac{du}{d\psi}\right)^2 = 4u^3 - g_2 u - g_3 \quad (18)$$

Donde g_2 y g_3 son los llamados invariantes de Weierstraß, y están dados por

$$g_2 = \frac{1}{12}, \quad Y \quad g_3 = \kappa V_0 - \frac{1}{216} \quad (19)$$

Al resolver esta ecuación cúbica utilizando el método de Cardano–Tartaglia, se obtienen las soluciones del polinomio cúbico dado por la ecuación (18)

$$s_0 = \frac{1}{3} \arccos(216 g_3)$$

$$h_1 = \frac{1}{6} \cos(s_0) - \frac{1}{12} \quad (20)$$

$$h_2 = \frac{1}{6} \left(-\frac{1}{2} \cos(x_0) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(x_0) \right) - \frac{1}{12}$$

$$h_3 = \frac{1}{6} \left(-\frac{1}{2} \cos(x_0) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(x_0) \right) - \frac{1}{12}$$

Las raíces del polinomio h_1 , h_2 y h_3 se expresan en términos de v_0 y satisfacen la condición $h_1 > h_2 > h_3$.

Para estudiar la naturaleza de las raíces, se utiliza el discriminante, que está dado por

$$\Delta_c = 16g_2^3 - 432g_3^2 \quad (21)$$

Se considerará para el análisis, solo las soluciones reales y distintas de la ecuación cubica (18), esto se cumple cuando $\Delta_c > 0$, utilizando la ecuación (21) se encontró que para cumplir esta condición el parámetro v_0 debe estar dentro del intervalo

$$v_0 \in (0, 1.65629 \times 10^7) \quad (22)$$

Ya con estos parámetros definidos se integra la ecuación (17) y se obtiene

$$H(\phi) = \wp^{-1}(\alpha \phi; g_2, g_3) - g_2 \quad (23)$$

Donde $\wp^{-1}(x; g_2, g_3)$ es la función elíptica inversa de Weierstraß. Aplicando el procedimiento estándar para integrar este tipo de funciones elípticas, se obtiene directamente la solución para el parámetro de Hubble en función del campo escalar.

$$H(\Phi) = h_1 + (h_1 - h_2) \operatorname{tn}(\sqrt{h_1 - h_3} \Phi)^2 \quad (24)$$

Donde Φ es un campo adimensional escalar dado por $\Phi(\phi) = (\phi - \phi_0)9\kappa/2$ donde ϕ_0 satisface la condición $H(\phi_0) = h_1$.

Por definición $\operatorname{tn}(x) \equiv \operatorname{tn}(x | k)$ es la función tangente elíptica de Jacobi y k es el módulo, que satisface $k^2 = (h_2 - h_3)/(h_1 - h_3)$.

En la figura (1) se muestra el gráfico del parámetro de Hubble dado por la ecuación (24)

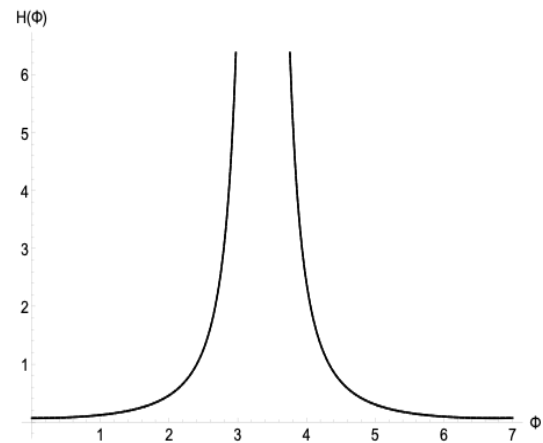


Figura 1: Gráfico del parámetro de Hubble $H(\Phi)$ en función del campo escalar adimensional Φ , usando $v_0 = 10^7$.

De la figura anterior se observa que $H(\Phi)$ crece de manera abrupta y luego decae rápidamente por ambos lados, se observa un comportamiento simétrico. El tipo de perfil indica que el campo escalar ϕ experimenta una región donde la expansión del universo es más intensa.

Por otro lado, se usaron las Ecs.(16) y (24), para graficar el potencial $V(\Phi)$ figura (2)

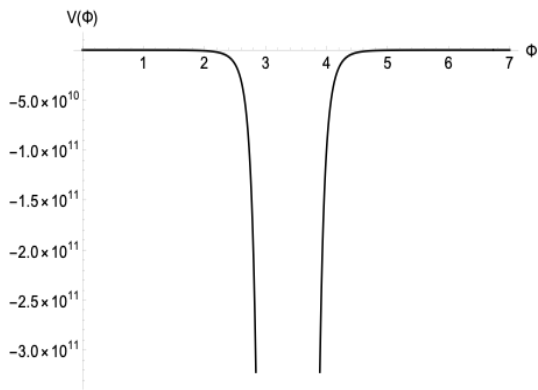


Figura 2: Gráfico del potencial $V(\Phi)$ como función del campo escalar adimensional Φ usando $v_0 = 10^7$.

Del gráfico anterior se observa que el potencial cae bruscamente cerca de $\Phi \sim 3.5$ pero posee una región plana y positiva que permite mantener la expansión acelerada del universo. Inicialmente, la energía cinética del campo dada por la ecuación (1) compensa la caída del potencial, sosteniendo $H > 0$.

Luego, usando la ecuación (24) y (11) se encuentra el factor de escala $a(\phi)$

$$a(\Phi) = a_i \left(\frac{\text{sn}(\sqrt{h_1 - h_3} \Phi)^{k^2} \cdot \text{dn}(\sqrt{h_1 - h_3} \Phi)^{\frac{(1-k^2)h_2}{h_1}}}{\text{sn}(\sqrt{h_1 - h_3} \Phi_i)^{k^2} \cdot \text{dn}(\sqrt{h_1 - h_3} \Phi_i)^{\frac{(1-k^2)h_2}{h_1}}} \right)^{\frac{h_1}{6(h_1 - h_2)(h_2 - h_3)}} \quad (25)$$

Donde, a_i denota el valor del factor de escala cuando el campo inflatón toma el valor ϕ_i que satisface $\Phi_i = \Phi(\phi_i)$, también la expresión anterior involucra funciones

elípticas, donde $\text{sn}(x) \equiv \text{sn}(x | k)$ y $\text{dn}(x) \equiv \text{dn}(x | k)$ son las funciones elípticas de Jacobi seno y delta amplitud, respectivamente. Esta expresión dice como cambia el tamaño del universo en función del campo inflatón.

La figura (3) muestra el gráfico de la ecuación (25)

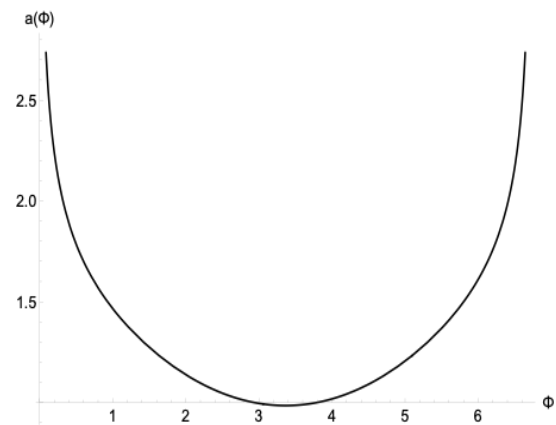


Figura 3: Factor de escala $a(\Phi)$ como función del campo escalar adimensional Φ , usando $\Phi_i = 3.8$ y $v_0 = 10^7$.

Ahora examinamos la relación entre el campo escalar Φ y el tiempo cósmico t . Tomando la derivada de la Ec. (24) y usando la Ec. (7), se obtiene:

$$k^2 \cdot \ln(\text{sd}(\sqrt{h_1 - h_3} \Phi)) + \ln(\text{dn}(\sqrt{h_1 - h_3} \Phi)) + 6r(h_2 - h_3)(h_1 - h_2) = 0 \quad (26)$$

A partir de la ecuación anterior se puede encontrar como varia Φ en función de t ,

Se resolvió de manera numérica la ecuación trascendental (26), y se creó la siguiente figura (4)

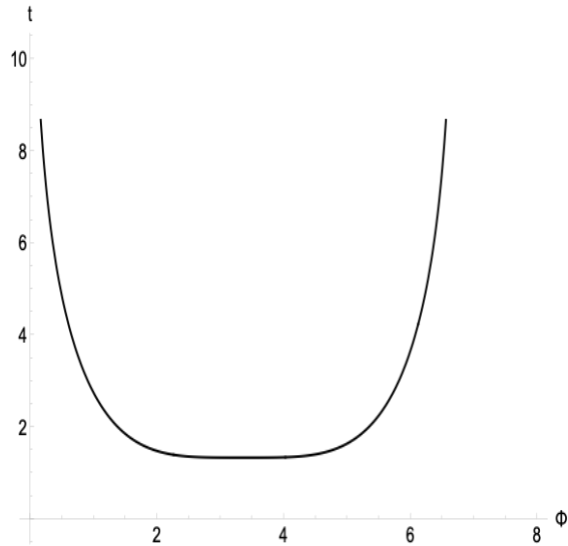


Figura 4: Tiempo cósmico t en función del campo escalar adimensional Φ , usando $w_0 = 10^7$.

El gráfico anterior muestra el tiempo cósmico t en función de Φ , se ve que es simétrico, esto es debido a la naturaleza de las funciones elípticas. Si consideramos solo la mitad del gráfico hacia la izquierda, se observa que a medida que pasa el tiempo, el campo escalar disminuye.

A partir de la ecuación (26), se parametrizó Φ en función de t y con la ecuación (24), se obtiene el parámetro de Hubble en función del tiempo cósmico t . La figura (5) muestra la gráfica de $H(t)$

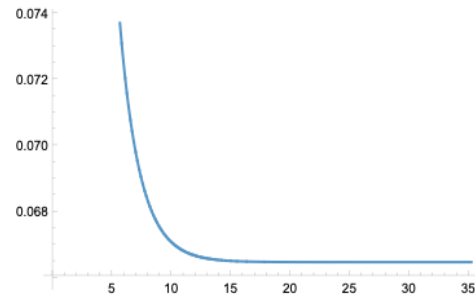


Figura 5: Gráfico del parámetro de Hubble H en función del tiempo cósmico t usando, $w_0 = 10^7$.

De la figura anterior se observa que el parámetro de Hubble disminuye a medida que pasa el tiempo.

Los resultados obtenidos muestran una coherencia interna en la dinámica del campo inflatón y la expansión del universo. La figura (1) muestra que el parámetro de Hubble $H(\Phi)$ presenta una asíntota cercana a $\Phi \sim 3.5$ y luego disminuye de manera simétrica, lo que refleja la naturaleza periódica de las funciones elípticas de Jacobi que caracterizan el modelo.

Esta naturaleza se ve reflejada en la forma del potencial $V(\Phi)$, como se ve en la figura (2) este posee una región plana y positiva seguida de una caída abrupta hacia una asíntota simétrica. En este escenario, la expansión puede mantenerse aproximadamente constante mientras el campo se encuentra en la región plana del potencial, pero se intensifica a medida que el inflatón evoluciona hacia los valores donde $V(\Phi)$ tiende a $-\infty$.

El análisis del factor de escala $a(\Phi)$ representado en la figura (3), al introducir un valor inicial arbitrario Φ_i , este crece a medida que el campo escalar disminuye. Esto se conecta con la relación temporal $\Phi(t)$, que indica que Φ disminuye conforme avanza el tiempo cósmico. De esta forma, la evolución temporal del universo es consistente con la dinámica del inflatón: la expansión se mantiene aproximadamente constante mientras Φ se encuentra en la región plana del potencial, y se intensifica cuando el campo evoluciona hacia valores donde $V(\Phi)$ tiende a $-\infty$.

El potencial tiene la característica de aumentar con el tiempo (ya que Φ disminuye), lo que indica que el universo experimenta una expansión acelerada inicial, seguida de una fase más estable, manteniendo una expansión acelerada en la región plana del potencial.

En conjunto, estos resultados muestran que el modelo basado en funciones elípticas de Jacobi captura lo esencial de la dinámica inflacionaria. Sin embargo, todavía no se ha

obtenido el parámetro de slow-roll dado por la Ec.(13), que permite determinar con precisión el final de la inflación, ni tampoco el número de e-foldings dado por la Ec.(14). Por lo tanto, no se puede asumir que los resultados sean completamente correctos, sino que deben entenderse

como una fase intermedia de la investigación.

Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado un modelo de inflación basado en un potencial propuesto en la Ec.(15), el cual conduce a una dinámica caracterizada por funciones elípticas de Jacobi y de Weierstraß. A partir de este planteamiento, se obtuvieron soluciones analíticas y numéricas que permiten describir de manera consistente un régimen inflacionario.

El análisis muestra que el modelo reproduce adecuadamente la dinámica del inflatón y la expansión del universo, evidenciando regiones planas del potencial que sostienen la expansión acelerada y caídas abruptas que intensifican temporalmente dicha expansión. El comportamiento del factor de escala y del parámetro de Hubble refleja la evolución temporal esperada del universo inflacionario.

Sin embargo, aún no se ha evaluado el parámetro de slow-roll ni el número de e-foldings, por lo que estos resultados deben considerarse una aproximación preliminar, representativa de una fase intermedia de la investigación y no del análisis completo del modelo inflacionario.

Referencias Bibliográficas

- Guth, A. H. (1981). Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems. *Physical Review D*, 23(2), 347–356.
- Albrecht, A., & Steinhardt, P. J. (1982). Cosmology for grand unified theories with radiatively induced symmetry breaking. *Physical Review Letters*, 48(17), 1220–1223
- Linde, A. D. (1982). A new inflationary universe scenario: A possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems. *Physics Letters B*, 108 (6), 389–393.
- Mukhanov, V. F., Feldman, H. A., & Brandenberger, R. H. (1992). Theory of cosmological perturbations. *Physics Reports*, 215(5-6), 203–333.
- Liddle, A. R., & Lyth, D. H. (2000). *Cosmological inflation and large-scale structure*. Cambridge University Press.
- Hinshaw, G., Larson, D., Komatsu, E., Spergel, D. N., Bennett, C., Dunkley, J., ... & Wright, E. L. (2013). Nine-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: cosmological parameter results. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 208(2), 19.
- Aghanim, N. (2020). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astron. Astrophys*, 641, A6.
- Akrami, Y., Arroja, F., Ashdown, M., Aumont, J., Baccigalupi, C., Ballardini, M., ... & Savelainen, M. (2020). Planck 2018 results-X. Constraints on inflation. *Astronomy & Astrophysics*, 641, A10.
- Liddle, A. R., Parsons, P., & Barrow, J. D. (1994). Formalizing the slow-roll approximation in inflation. *Physical Review D*, 50(12), 7222.
- Salopek, D. S., & Bond, J. R. (1990). Nonlinear evolution of long-wavelength metric fluctuations in inflationary models. *Physical Review D*, 42(12), 3936.
- del Campo, S. (2012). Approach to exact inflation in modified Friedmann equation. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2012(12), 005.
- del Campo, S. (2013). Single-field inflation à la generalized Chaplygin gas. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2013(11), 004.

Villanueva, J. R., & Gallo, E. (2015). A
Jacobian elliptic single-field

inflation. *The European Physical
Journal C*, 75(6), 256.

24.- Ciencia e ingeniería de materiales

Implementación de Homogeneización *Mori-Tanaka Multi-Step* en Hormigones Permeables

Autor: Martínez-Mejías, Oscar; oscar.martinez@usach.cl

Co-autor: Brescia-Norambuena, Leonardo; leonardo.brescia@usach.cl

Orientador: Guzmán, Carlos Felipe; cf.guzman@usach.cl

Universidad de Santiago de Chile (USACH), Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil en Obras Civiles

Resumen

Esta investigación implementa un modelo multiescala basado en el método *Mori-Tanaka Multi-Step* para estimar el módulo de elasticidad efectivo en hormigones permeables. La formulación incorpora explícitamente la granulometría del agregado y el efecto mecánico de la zona de transición interfacial (ITZ). Se desarrolló una herramienta computacional y se realizó la validación mediante datos experimentales de la literatura. Los resultados mostraron que, para un hormigón de 30 MPa, el modelo *Multi-Step* arrojó un error de 7,7 %, mientras que el enfoque tradicional presentó un error del 25,7 %. Para el caso del hormigón de 60 MPa, el error se redujo de 9,9 % a 6,3 % al emplear el esquema *Multi-Step*. Además, se observó que un mayor espesor de ITZ reduce la rigidez del compuesto, y que partículas más alargadas incrementan el módulo efectivo, incluso con fracciones volumétricas constantes. Se concluye que el enfoque *Multi-Step* permite representar con mayor precisión el comportamiento de mezclas heterogéneas al incorporar la inclusión progresiva de fases y características morfológicas del sistema. Esto refuerza su aplicabilidad como herramienta predictiva para el diseño de hormigones permeables con propiedades mecánicas optimizadas.

Palabras clave: Homogeneización, Hormigón permeable, Mori-Tanaka

Introducción

El hormigón permeable ha adquirido un rol protagónico dentro de las soluciones constructivas sostenibles, especialmente en pavimentación urbana. Su estructura altamente porosa permite la infiltración directa del agua hacia el subsuelo, lo que contribuye al control de escorrentías, la reducción de inundaciones y la recarga de acuíferos (Malhotra, 1976). Desde su uso inicial en viviendas económicas en la década de 1930, su aplicación se ha expandido hacia soluciones urbanas más complejas.

Sin embargo, factores como la relación agua/cemento, el tamaño y proporción de agregados, la porosidad y el método de compactación tienen una gran influencia directa sobre sus propiedades estructurales (Seeni & Madasamy, 2021). Adicionalmente, este material enfrenta dos problemas fundamentales: i) baja resistencia a compresión, y ii) dificultad para identificar la combinación óptima de materiales en la mezcla que permita equilibrar el desempeño mecánico y permeabilidad.

Para enfrentar estas problemáticas, resulta fundamental el uso de herramientas analíticas que permitan estimar el comportamiento efectivo de un material tan heterogéneo como el hormigón permeable. En este sentido, los modelos de homogeneización se han consolidado como metodologías clave para predecir las propiedades macroscópicas de materiales

compuestos a partir de sus fases constituyentes. Entre ellos, el método de Mori-Tanaka (1973), basado en la solución de inclusión elipsoidal formulada por Eshelby (1957), permite calcular de forma eficiente propiedades efectivas como los módulos elásticos. Este enfoque ha demostrado ser particularmente útil en sistemas con inclusiones dispersas.

Dicha metodología ha sido extendida a esquemas jerárquicos de múltiples pasos (*Multi-Step*), en los cuales se integran fases adicionales en etapas sucesivas. Este enfoque permite el modelado cada fracción como una fase independiente (García-Macías, Castro-Triguero, & Ubertini, 2018). Además, permite considerar vacíos saturados y efectos interfaciales, lo que mejora la capacidad predictiva del modelo ante variaciones de humedad (Bacciocchi, Savino, Lanzoni, Tarantino, & Viviani, 2022; Vu, Tran, Le, & Nguyen, 2021)

No obstante, a pesar de su aplicación en distintos materiales, su aplicación en hormigones permeable ha sido limitada en la literatura, y generalmente omite factores críticos como la zona de transición interna (Interfacial Transition Zone, ITZ) y la distribución granulométrica del agregado. Debido a esto, esta investigación propone implementar una formulación *Multi-Step* del método de Mori-Tanaka, orientada al análisis micromecánico de hormigones permeables. A diferencia de enfoques convencionales, el

modelo desarrollado incorpora explícitamente análisis granulométrico reales como base del análisis, así como caracterización de la ITZ para predecir el comportamiento efectivo de este material.

diversas configuraciones.

- Validar el modelo mediante comparación con resultados experimentales y con los rangos establecidos en la norma ACI 522R-10 (American Concrete Institute, 2010).

Objetivos

Objetivo general

Implementar una formulación multiescala basada en el método de homogeneización *Multi-Step Mori-Tanaka*, orientada a estimar las propiedades mecánicas efectivas del hormigón permeable, incorporando la granulometría del agregado y los efectos de la ITZ.

Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo numérico *Multi-Step* que represente la granulometría del agregado mediante fases sucesivas, asociadas a intervalos de tamaño definidos.
- Incorporar en el modelo el efecto mecánico de la ITZ, considerando sus propiedades y espesor.
- Considerar la presencia de vacíos y el grado de saturación del material, incluyendo su efecto en los módulos efectivos a través de una formulación por fases.
- Implementar computacionalmente el modelo en Python, generando una herramienta que calcule el tensor constitutivo de forma eficiente para

Materiales y Métodos

Formulación Mori-Tanaka

El modelo propuesto se fundamenta en la formulación descrita (García-Macías et al., 2018), orientada a representar la microestructura del hormigón permeable. En este trabajo se aplican dos variantes del método de Mori-Tanaka: un modelo *Two-Step* y una *Multi-Step* que considera explícitamente la granulometría del agregado. A continuación, se presentan ambas formulaciones.

a) *Two-Step Mori-Tanaka*

Este modelo permite estimar la rigidez efectiva de un material poroso compuesto por una matriz cementicia reforzada con partículas elipsoidales, incluyendo el efecto de la ITZ, y la posterior incorporación de vacíos parcialmente saturados. Esta representación se aprecia en la Figura 1.

En el primer paso, se considera una fase de matriz Ω_m , una inclusión de partícula elipsoidal Ω_p y una ITZ Ω_i que rodea la partícula, conformando un sistema de doble inclusión. Las fases son homogéneas y

lineales elásticas, caracterizadas por sus respectivos tensores constitutivos \mathbf{C}_m , \mathbf{C}_p , \mathbf{C}_i . La rigidez efectiva del compuesto $\bar{\mathbf{C}}_m$ se calcula con la ecuación (1). Los tensores de concentración de partícula \mathbf{A}_p y de interfaz \mathbf{A}_i se definen en las ecuaciones (2) y (3). Ambos dependen del contraste de rigidez entre las fases y de la forma geométrica de las inclusiones, expresada a través de los tensores de Eshelby \mathbf{S}_p y \mathbf{S}_i respectivamente. Dichos tensores de Eshelby \mathbf{S} dependen de la forma de la inclusión (esférica, oblata o prolata) y de su orientación, y actúan como operadores de localización de campos.

En el segundo paso se considera una fase de matriz homogeneizada en el paso anterior $\bar{\Omega}_m$, una inclusión de partícula elipsoidal de vacío Ω_v . Las fases son homogéneas y lineales elásticas, caracterizadas por sus respectivos tensores constitutivos $\bar{\mathbf{C}}_m$, \mathbf{C}_v . La rigidez efectiva global $\bar{\mathbf{C}}$ se determina por según la ecuación (4), donde el tensor de concentración correspondiente a los vacíos \mathbf{A}_v se determina según la ecuación (5).

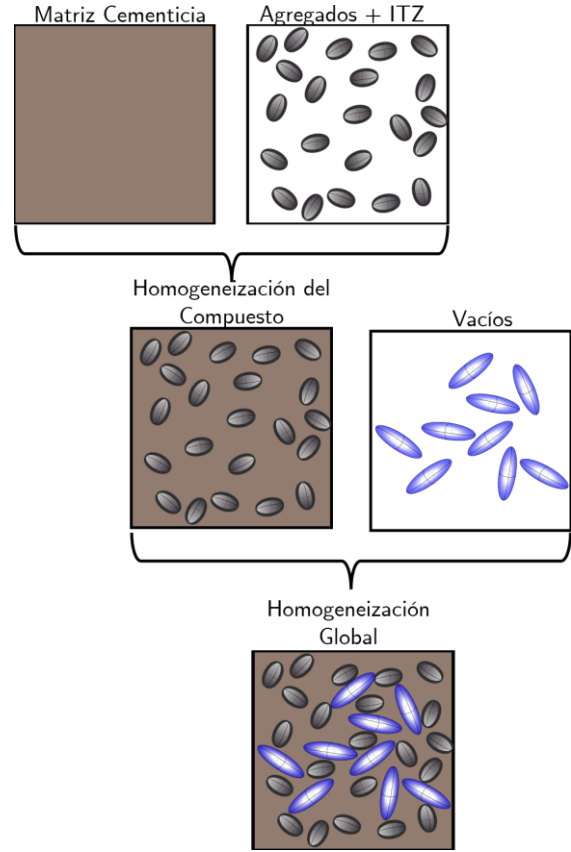


Figura 1: Two-Step Mori-Tanaka

$$\bar{\mathbf{C}}_m = (f_m \mathbf{C}_m + f_i \mathbf{C}_i : \mathbf{A}_i + f_p \mathbf{C}_p : \mathbf{A}_p) : (f_m \mathbf{I} + f_i \mathbf{A}_i + f_p \mathbf{A}_p)^{-1} \quad (1)$$

$$\mathbf{A}_p = [\mathbf{I} + \mathbf{S}_p : (\mathbf{C}_p - \mathbf{C}_m) : \mathbf{C}_m^{-1}]^{-1} \quad (2)$$

$$\mathbf{A}_i = [\mathbf{I} + \mathbf{S}_i : (\mathbf{C}_i - \mathbf{C}_m) : \mathbf{C}_m^{-1}]^{-1} \quad (3)$$

$$\bar{\mathbf{C}} = ((1 - \phi) \bar{\mathbf{C}}_m + \phi \mathbf{C}_v : \mathbf{A}_v) : ((1 - \phi) \mathbf{I} + \phi \mathbf{A}_v)^{-1} \quad (4)$$

$$\mathbf{A}_v = [\mathbf{I} + \mathbf{S}_v : (\mathbf{C}_v - \bar{\mathbf{C}}_m) : \bar{\mathbf{C}}_m^{-1}]^{-1} \quad (5)$$

b) *Multi-Step Mori-Tanaka*

El modelo *Multi-Step* propuesto extiende la formulación clásica de *Mori-Tanaka* para abordar la heterogeneidad de los hormigones permeables con granulometrías amplias. A diferencia del enfoque *Two-Step*, donde los agregados son tratados como una fase única, el presente modelo considera de manera explícita cada fracción de tamaño del agregado como una fase independiente. Esto permite incorporar el efecto real de la curva granulométrica en la estimación de las propiedades efectivas del material.

La metodología se basa en una estrategia de homogeneización iterativa. En cada paso, se homogeneiza la matriz obtenida de la etapa anterior con una nueva fracción de agregado y su correspondiente ITZ. Esta operación se repite hasta completar todas las fracciones representadas en la distribución granulométrica. Finalmente, se considera la inclusión de los vacíos (porosidad) mediante una última etapa de homogeneización.

Para realizar esto, se comienza del tensor constitutivo de la matriz cementicia \mathbf{C}_m asignado como \mathbf{C}_0 al corresponder al inicio de la iteración, tal como se describe en la

ecuación (6). Por cada paso, se homogeneiza la matriz obtenida del paso anterior con la fracción -ésima del agregado y su correspondiente ITZ según la iteración mostrada en la ecuación (7). Finalmente, se homogeneiza el sistema completo con los vacíos equivalentes según la ecuación (8).

Parámetros del material y validación

Para implementar el modelo *Multi-Step* propuesto y simular el comportamiento efectivo del hormigón permeable, se utilizaron valores típicos reportados en la literatura para materiales cementicios convencionales. Estos parámetros corresponden a pasta de cemento, agregados naturales, ITZ, así como a condiciones de porosidad y saturación. Si bien estos valores no han sido específicamente caracterizados en hormigones permeables, constituyen una base para aproximar su comportamiento en ausencia de datos experimentales directos. Su inclusión en el modelo permite analizar la sensibilidad de las propiedades efectivas frente a variaciones en dichos parámetros, lo que entrega información relevante sobre su influencia en la rigidez global del material. La

$$\bar{\mathbf{C}}_0 = \mathbf{C}_m \quad (6)$$

for $k = 1$ *to* N :

$$\bar{\mathbf{C}}_k = (f_{m,k} \bar{\mathbf{C}}_{k-1} + f_{i,k} \mathbf{C}_{i,k} : \mathbf{A}_{i,k} + f_{p,k} \mathbf{C}_{p,k} : \mathbf{A}_{p,k}) : (f_{m,k} \mathbf{I} + f_{i,k} \mathbf{A}_{i,k} + f_{p,k} \mathbf{A}_{p,k})^{-1} \quad (7)$$

end for

$$\bar{\mathbf{C}} = ((1 - \phi) \bar{\mathbf{C}}_N + \phi \mathbf{C}_v : \mathbf{A}_v) : ((1 - \phi) \mathbf{I} + \phi \mathbf{A}_v)^{-1} \quad (8)$$

Tabla 1 resume los valores utilizados en los análisis. ITZ.

Tabla 1: Parámetros considerados

Parámetro	Rango típico
Módulo de Young, pasta	E_m 10–25 GPa
Poisson, pasta	μ_m 0.18–0.22
Módulo de Young, agregado	E_p 50–80 GPa
Poisson, agregado	μ_p 0.18–0.25
Porcentaje, agregado	f_p 0.55–0.70
Módulo de Young, ITZ	E_i $0.1–0.3 \times E_m$
Poisson, ITZ	$\mu_i \approx \mu_m$
Espesor, ITZ	t_i 10–50 μm
Porcentaje, vacío	f_v 0.15–0.35
Módulo volumétrico, vacío	$K_v \approx 0$ GPa
Módulo de corte, vacío	$G_v \approx 0$ GPa
Módulo volumétrico, agua	K_w 2.2–2.3 GPa
Módulo de corte, agua	$G_w \approx 0$ GPa
Saturación de vacíos	S 0–1
Relación de aspecto, partículas	κ_p 1–1.5
Relación de aspecto, vacíos	κ_v 1–2
Agregados (curva Fuller)	4.75–20 mm

Para validar el modelo, se consideraron los resultados de dos estudios previos. El primero corresponde al trabajo de Bacciocchi et al., (2022), donde se aplica homogenización Mori-Tanaka en materiales con fracción variable de agregados, permitiendo evaluar la evolución del módulo de elasticidad frente a cambios en la granulometría y la fracción volumétrica de los agregados. El segundo estudio corresponde a Beushausen & Dittmer, (2015), donde se analiza el efecto del tipo de agregado en el módulo elástico del hormigón, aportando datos experimentales valiosos para calibrar el modelo propuesto, aunque sin caracterización detallada de materiales, ni

Resultados y Discusión

Con el fin de comprender cómo el espesor de la interfase afecta el desempeño mecánico del hormigón permeable, la Figura 2 muestra la evolución del módulo de Young efectivo longitudinal E_1 (normalizado respecto al módulo de la matriz, E_m) en función de la fracción volumétrica de partículas gruesas, para tres espesores distintos de interfase ($t_i = 10 \mu m, 30 \mu m, 50 \mu m$). Este análisis se realizó considerando una microestructura representativa de un hormigón permeable, compuesto por una matriz de pasta de cemento, partículas de agregado grueso, ITZ, vacío y saturación con agua, con forma no esférica tanto en partículas como en vacíos (representado por factores de forma $\kappa_p = 1.2, \kappa_v = 1.5$).

Se observa un comportamiento creciente del módulo de Young efectivo respecto a la fracción de partículas, lo cual es consistente con el hecho de que el agregado tiene un módulo significativamente mayor que la matriz. Sin embargo, para un mismo valor de f_p , el valor del módulo de Young normalizado disminuye al aumentar el espesor de la interfaz, debido al carácter mecánicamente débil de esta capa intermedia. Esto se explica porque a medida que aumenta el espesor de la interfase, crece también la fracción efectiva del material ocupada por una región de baja

rigidez, lo cual perjudica la eficiencia de transferencia de esfuerzos entre la matriz y las partículas.

Además del espesor de ITZ, otro parámetro morfológico relevante en la microestructura

del hormigón permeable es la forma de las partículas del agregado grueso. Para estudiar este efecto, se evaluó el módulo elástico efectivo mediante el modelo de *Mori-Tanaka Multi-Step* considerando distintos valores del factor de forma, el cual representa la

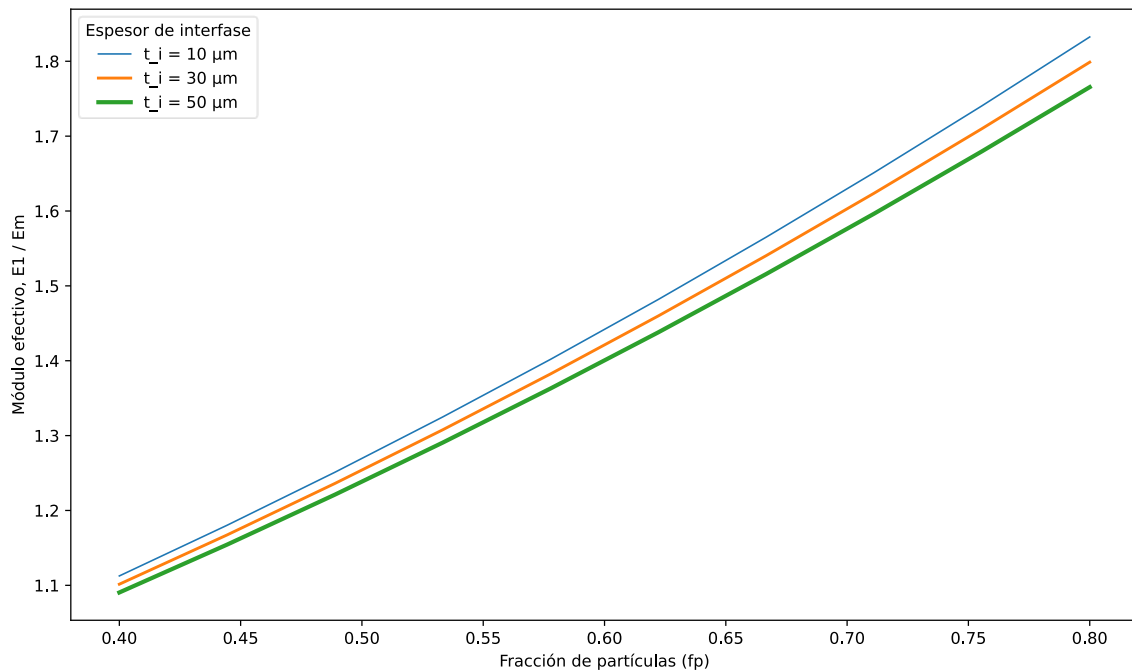


Figura 2: Influencia del espesor de la interfase en el módulo elástico efectivo normalizado

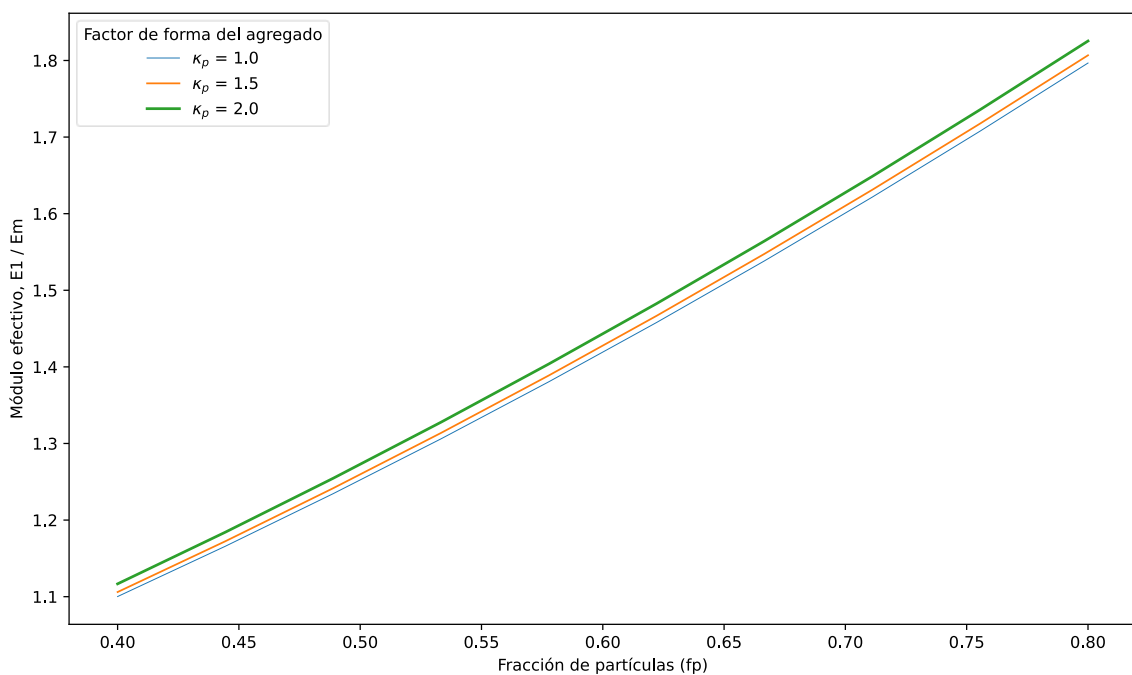


Figura 3: Influencia del factor de forma del agregado en el módulo elástico efectivo

elipticidad de las inclusiones. En la se presentan los resultados obtenidos para $\kappa = 1$ (forma esférica), $\kappa = 1.5$ y $\kappa = 2.0$ (partículas alargadas), manteniendo constante el espesor de interfase (ver Figura 3).

Se observa que, a igualdad de fracción volumétrica, el módulo de Young efectivo normalizado aumenta con el valor del factor de forma. Esta tendencia indica que las partículas más alargadas o elípticas contribuyen en mayor medida a la rigidez global del material. Este comportamiento se debe a que inclusiones con mayor anisotropía geométrica inducen un campo de tensiones más efectivo en la matriz, mejorando la transferencia de esfuerzos y, en consecuencia, elevando el módulo efectivo del compuesto. La diferencia entre curvas se

incrementa levemente conforme aumenta la fracción de partículas, debido a que la influencia de la forma se vuelve más significativa cuando hay una mayor proporción de inclusiones en el sistema.

Posteriormente, se realizó una validación del modelo mediante comparación con datos experimentales reportados por Bacciocchi et al., (2022) que corresponden a mediciones del módulo de Young en función de la fracción de agregado. La Figura 4 ilustra esta comparación, incluyendo también la predicción del modelo original de Bacciocchi (el cual no considera la existencia de una interfase) así como distintas variantes desarrolladas en este trabajo: una versión de una sola etapa sin ITZ, otra incluyendo ITZ, y un modelo *Multi-Step* que incorpora la distribución granulométrica mediante un

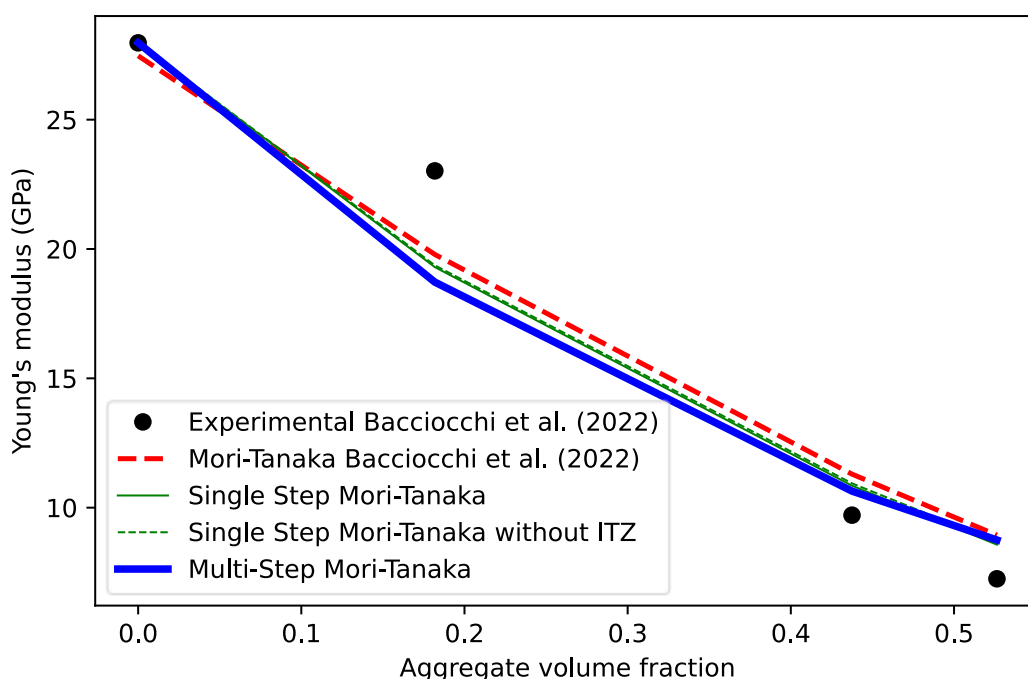


Figura 4: Influencia del espesor de la interfase en el módulo elástico efectivo normalizado

esquema progresivo. Se observa que los modelos que consideran la interfase predicen un menor módulo elástico, ajustándose mejor a los valores experimentales especialmente en el rango de fracciones elevadas. En cambio, los modelos sin ITZ tienden a sobrestimar la rigidez del compuesto. La versión *Multi-Step*, que incluye tanto la ITZ como la granulometría detallada, ofrece la mejor aproximación general al comportamiento observado, lo cual respalda la relevancia de incorporar ambos aspectos en modelos micromecánicos aplicados a hormigones permeables.

Finalmente, se compararon las predicciones del módulo de elasticidad con datos experimentales reportados por Beushausen & Dittmer, (2015) en hormigones

tradicionales con resistencias características de 30 MPa y 60 MPa. La Figura 5 presenta esta comparación, donde se muestran los valores medidos experimentalmente junto con las estimaciones obtenidas mediante dos esquemas distintos de modelado: el enfoque *Single-Step Mori-Tanaka*, que considera la incorporación de las partículas en una única etapa, y el esquema *Multi-Step Mori-Tanaka*, que introduce gradualmente la granulometría siguiendo una secuencia progresiva basada en la distribución de tamaños.

Para el hormigón de 60 MPa, el valor experimental del módulo de Young fue de 42.17 GPa. El modelo *Multi-Step* arrojó un valor de 44.81 GPa, lo que representa un error relativo de 6.3 %, mientras que el modelo *Single-Step* estimó 46.34 GPa, con

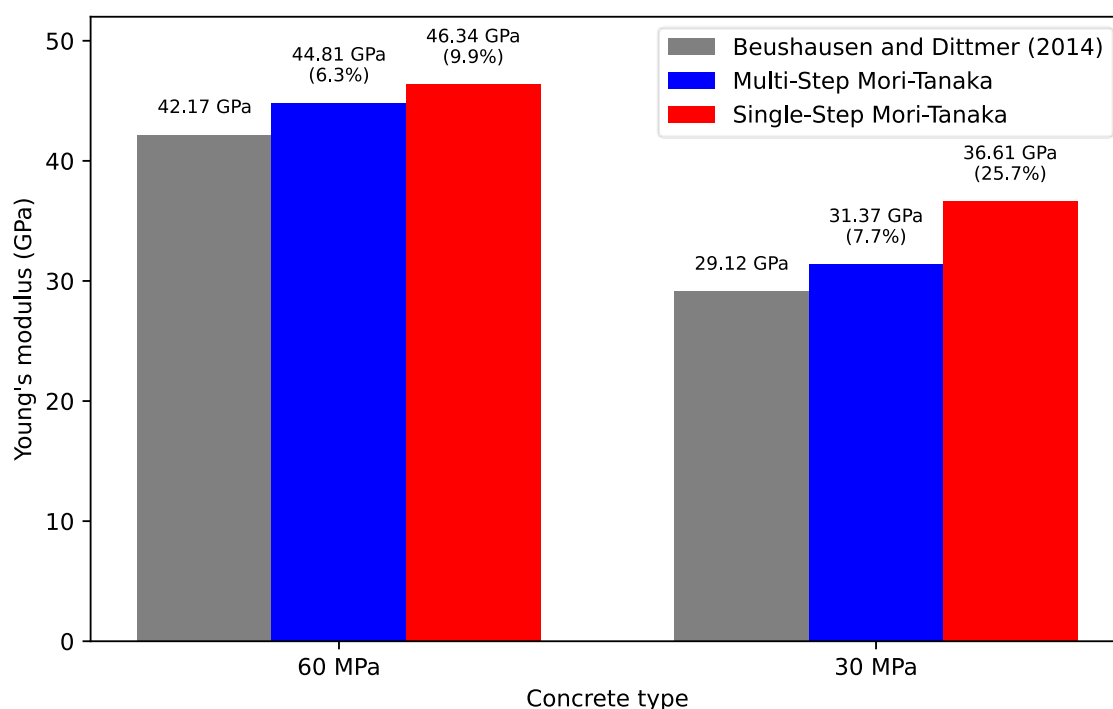


Figura 5: Comparación del módulo de Young para hormigones con resistencia característica de 30 MPa y 60 MPa

un error mayor del 9.9%. En el caso del hormigón de 30 MPa, el módulo medido fue de 29.12 GPa, mientras que el modelo *Multi-Step* predijo 31.37 GPa (7.7 % de error) y el *Single-Step* alcanzó 36.61 GPa (25.7 % de error).

Estos resultados reflejan que el enfoque *Multi-Step* permite una mejor aproximación al comportamiento observado experimentalmente, particularmente en hormigones de menor resistencia, donde la distribución de tamaños de agregado tiene un impacto más pronunciado en la respuesta mecánica. El modelo *Single-Step* tiende a sobreestimar la rigidez, debido a que no incorpora la naturaleza jerárquica y progresiva de la inclusión de partículas en el material compuesto.

Conclusiones

Los resultados obtenidos mediante el modelo *Multi-Step Mori-Tanaka* permiten extraer conclusiones relevantes sobre la microestructura del concreto permeable. Se evidencia que la zona de interfase (ITZ) entre matriz y agregado tiene un efecto significativo en la rigidez del compuesto. A igualdad de fracción volumétrica, un mayor espesor de ITZ reduce el módulo elástico efectivo. Esto se debe a su menor rigidez, que interrumpe la transferencia de esfuerzos entre fases. Ignorar esta zona lleva a una sobrestimación de la rigidez del material.

Este efecto es más notorio en mezclas con

mayor contenido de agregado grueso. En tales casos, aumenta la superficie de contacto y, con ella, el volumen total de ITZ. Así, la modelación precisa de esta interfase es clave en concretos porosos. En estos materiales, la heterogeneidad y la porosidad condicionan fuertemente el desempeño mecánico. Por tanto, representar la ITZ mejora sustancialmente la fidelidad del modelo.

Adicionalmente, se observó que la forma de las partículas del agregado también influye en las propiedades efectivas. El análisis paramétrico mostró que geometrías más alargadas incrementan el módulo de elasticidad del compuesto. Este comportamiento se asocia a una mejor interacción mecánica entre partículas elípticas y matriz. Aunque la fracción volumétrica sea constante, la geometría aporta un efecto adicional. Por ello, se recomienda incorporar la morfología del agregado en modelos predictivos.

Se realizó una validación cuantitativa frente a datos experimentales de concretos convencionales de 30 MPa y 60 MPa. El modelo *Multi-Step Mori-Tanaka* presentó mejores resultados que el enfoque clásico de una sola etapa. En particular, capturó mejor la respuesta de mezclas heterogéneas. Esta mejora se explica por la incorporación progresiva de la granulometría en el modelo. En contraste, el enfoque *Single-Step* tiende a sobreestimar la rigidez al suponer inclusión

instantánea de todas las partículas.

En conjunto, se concluye que una representación realista del concreto requiere más que parámetros clásicos como módulo y fracción volumétrica. Factores como la presencia de interfases, la forma de las inclusiones y su distribución granulométrica deben ser considerados. El modelo *Multi-Step* desarrollado demuestra ser una herramienta robusta y versátil. Permite explorar con mayor precisión la relación entre microestructura y propiedades mecánicas. Esto lo convierte en un aporte valioso para el estudio de concretos permeables complejos.

Referencias Bibliográficas

American Concrete Institute. (2010). *ACI 522R-10* (No. ISBN 978-0-87031-364-6).

Baccocchi, M., Savino, V., Lanzoni, L., Tarantino, A. M., & Viviani, M. (2022). Multi-phase homogenization procedure for estimating the mechanical properties of shot-earth materials. *Composite Structures*, 295, 115799. doi: 10.1016/j.compstruct.2022.115799

Beushausen, H., & Dittmer, T. (2015). The influence of aggregate type on the

strength and elastic modulus of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 74, 132–139. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.055

Eshelby, J. D. (1957). The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 241(1226), 376–396. doi: 10.1098/rspa.1957.0133

García-Macías, E., Castro-Triguero, R., & Ubertini, F. (2018). Two-step hierarchical micromechanics model of partially saturated porous composites doped with ellipsoidal particles with interface effects. *Composites Part B: Engineering*, 148, 49–60. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.04.037

Malhotra, V. (1976). No-Fines Concrete—Its Properties and Applications. *ACI Journal Proceedings*, 73(11). doi: 10.14359/11104

Mori, T., & Tanaka, K. (1973). Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions.

Acta Metallurgica, 21(5), 571–574.

10.1016/j.mechrescom.2021.103791

doi: 10.1016/0001-6160(73)90064-3

Seeni, B. S., & Madasamy, M. (2021). Factors influencing performance of pervious concrete. *BERISLAVICEVA* 6, ZAGREB, 00000, CROATIA: CROATIAN SOC CIVIL ENGINEERS-HSGI. doi: 10.14256/JCE.2997.2020

Vu, V.-H., Tran, B.-V., Le, B.-A., & Nguyen, H.-Q. (2021). Prediction of the relationship between strength and porosity of pervious concrete: A micromechanical investigation. *Mechanics Research Communications*, 118, 103791. doi:

Financiamiento

O. Martínez-Mejías agradece el apoyo financiero otorgado por la Vicerrectoría de Postgrado y la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Santiago de Chile (USACH), a través de la Beca de Arancel y Mantención; y del Fondo de Apoyo a la Investigación.

L. Brescia-Norambuena agradece el apoyo financiero de la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) a través del proyecto NFU-EVOLUCIÓN, código 24TECPA-272151.

C.F. Guzmán agradece el apoyo financiero de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) a través del proyecto Fondecyt No. 1240989.

27.- Ciencia, tecnología e innovación

**Extracción de celulosa a partir de biomasa residual de cepas locales de
Cannabis medicinal.**

Autores: Dakak, Sebastián; sebadakak@hotmail.com

Orientadoras: Cattaneo, Florencia; florenciacattaneo@csnat.unt.edu.ar - Isla, María

Inés; misla@csnat.unt.edu.ar - Zampini, Catiana; zampini@csnat.unt.edu.ar

Universidad Nacional de Tucumán (UNT) / Facultad de Ciencias Naturales e Instituto

Miguel Lillo-Instituto de Bioprospección y Fisiología Vegetal (INBIOFIV)

Resumen

El avance en la industria argentina del *Cannabis* medicinal ha permitido en los últimos años no solo mejorar la calidad de vida de pacientes con diversas patologías sino el desarrollo económico, generado por el aprovechamiento de las inflorescencias para el desarrollo de numerosos productos a base de *Cannabis* medicinal. Por otro lado, se abrió la posibilidad de desarrollar cadenas de valor a partir de sus subproductos (tallos, hojas y residuos florales). Esto es importante para el desarrollo económico e industrial desde una perspectiva sustentable. El objetivo general de este trabajo es el aprovechamiento de la biomasa residual de *Cannabis sativa* postcosecha, específicamente tallos y residuos florales luego de la extracción de principios farmacológicamente activos para obtener celulosa con diversas aplicaciones en la industria, como la producción de papel, bioplásticos, materiales compuestos o excipientes farmacéuticos.

El material vegetal se pulverizó en molinos a cuchillas y se estandarizó de acuerdo con su granulometría. Las fracciones obtenidas, tallo fracción "fina" y "gruesa"; e inflorescencias fracción "fina" y "gruesa" con granulometría >840 micrones (gruesa) y <840 micrones (fina) se utilizaron para la obtención de celulosa. Cada fracción se deslignificó con métodos fisicoquímicos (NaOH-120°C-1 atm) y luego se realizó un blanqueamiento de la fibra con H₂O₂-120°C-1 atm. Los rendimientos del proceso de extracción de celulosa y sus características colorimétricas (parámetros L, a, b) proporcionó información valiosa de la calidad del producto obtenido y la eficacia del proceso de extracción para cada subproducto. La fracción "gruesa" del tallo presentó el mayor rendimiento de extracción, sin embargo, la celulosa obtenida de los residuos de inflorescencias mostró mayor luminosidad y parámetros colorimétricos apropiados.

Palabras clave: celulosa, cannabis medicinal, subproductos

Introducción

La industria relacionada a los productos de *Cannabis* ha sufrido un desarrollo vertiginoso en los últimos años, acompañado de legislaciones que regulan sus usos terapéuticos (Corda y col. 2019; Ferreyra, 2022). Con respecto al *Cannabis* medicinal, el tamaño de la industria a nivel mundial en el año 2024, se ha estimado en 7,5 a 20,3 mil millones de dólares de acuerdo a diferentes consultoras (Cannabidiol market size and share industry report, 2030; Patil, 2025; Pawar, 2025) y con grandes proyecciones de crecimiento para los años venideros. La producción del *Cannabis* medicinal se sustenta principalmente en el aprovechamiento de los compuestos bioactivos de las inflorescencias (cannabinoides, terpenos y compuestos fenólicos). Estos compuestos se obtienen exponiendo las inflorescencias a diferentes procedimientos de extracción convencionales, como maceración con distintos solventes, extracciones con disolventes, e hidrodestilación, y no convencionales como las extracciones con fluidos supercríticos, ultrasonido y microondas (Chacon y col., 2024; Lazarjani y col. 2021). Por otro lado, los tallos de las plantas medicinales y el resto de la planta que no se utiliza generalmente se descartan. Por cada kilogramo de inflorescencia de *Cannabis* cosechado, resultan entre 1,5 y 4,5 kilogramos de tallo desechado (Peterson, 2019). De manera

tal que para una plantación de *Cannabis* medicinal de 500 m², con 10 plantas en promedio por metro cuadrado y con seis ciclos de cosecha al año; se producirían 2250 kg de biomasa residual (Pérez y col. 2023). La utilización de estos subproductos, con una producción sustentable del cultivo de *Cannabis* medicinal, es una alternativa interesante, desde el punto de vista económico y ecológico. La planta de *Cannabis* presenta un rápido crecimiento vegetativo, y sus cultivos utilizan menos agua y menos pesticidas que cultivos de algodón (Crini y col., 2020), pero consume muchos recursos y requiere más agua que otros cultivos como el trigo, la soja y el maíz (Robertson y col., 2023). En cuanto a su estructura, presenta paredes celulares ricas en celulosa y pobres en lignina y hemicelulosa (Hancock, 2023). Se informó que las fibras celulósicas del *Cannabis* tienen grandes atributos como resistencia, durabilidad, capacidad de absorción, y excelente resistencia a la radiación ultravioleta (Solís García y col., 2025). Además, tiene propiedades antifúngicas y antibacterianas, por lo que tiene potencial aplicación en el área de la salud (Rana y Gupta, 2020). Por último, son muy utilizadas en la fabricación de bioplásticos y como biocombustible (Crini y col, 2020). Para el aprovechamiento de la celulosa es importante la eliminación de los compuestos cementantes, como lignina, pectinas y hemicelulosa, para ello pueden

emplearse una variedad de técnicas enzimáticas, químicas, fisicoquímicas y microbianas (Solís García y col., 2025). En este trabajo se utilizó un método de extracción químico de celulosa a partir de diferentes materiales de partida (tallo y residuo de inflorescencia), evaluando un proceso directo para aplicaciones industriales.

Objetivos

El objetivo general de este trabajo es el aprovechamiento de la biomasa residual postcosecha de *Cannabis sativa*, específicamente tallos y residuos florales luego de la extracción de principios farmacológicamente activos para obtener celulosa para aplicaciones en la industria del papel, bioplásticos, materiales compuestos o excipientes farmacéuticos.

Objetivos específicos:

*Extraer celulosa a través de métodos fisicoquímicos a partir de distintas muestras, definidas de acuerdo con el órgano de origen y al tamaño de partícula vegetal.

*Cuantificar los rendimientos de extracción de celulosa a partir de las distintas muestras.

*Realizar un análisis colorimétrico para evaluar la calidad de las fibras obtenidas.

Materiales y métodos

Material vegetal

Se trabajó con material vegetal obtenido de *C. sativa* cultivadas en San Miguel de Tucumán. Se utilizaron dos tipos de residuos vegetales, restos de inflorescencias, previamente extraídas con etanol, y tallos. El material se pulverizó en un molino a cuchillas (ARCANO®).

Ensayo granulométrico

El material pulverizado se sometió a un tamizado a través de 5 mallas (ZONYTEST® LR 2006 DIGITAL) de distinta granulometría: 840 micrones, 500 micrones, 149 micrones, 105 micrones, y 74 micrones (Figura N°1). Se calculó el rendimiento de cada fracción, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento} = \frac{M_F(g)}{M_T(g)} * 100$$

M_F : masa de la fracción granulométrica.

M_T : masa total de la muestra.

Luego del ensayo granulométrico se reunieron las fracciones < 840 micrones, denominado fracción “fina”, y las fracciones > 840 micrones que conformaron la fracción “gruesa” (Figura N°2).

Extracción de celulosa

Se pesó 10 gramos de cada muestra y se agregó 250mL de Na(OH) 10% (v/v) y se llevó a 120°C - 1 atm (sobrepresión) - 30 minutos en autoclave. Posteriormente se

filtró con lienzo y se recuperó el sólido grueso descartándose el sobrenadante. El proceso se repitió dos veces. Luego del proceso de deslignificado se procedió al blanqueamiento con peróxido de hidrógeno (H_2O_2). Al residuo sólido se agregó 250 mL de H_2O_2 al 10% v/v, se ajustó el pH entre 9 y 10 con HCl concentrado, y se procedió a efectuar un calentamiento a 60°C con agitación a 70 rpm durante 90 minutos. Terminado este proceso se filtra con gasa fina, se recupera el sólido y se repite el blanqueamiento en iguales condiciones. La fracción sólida recuperada se lava con agua destilada, se congela y liofiliza.

Ensayo colorimétrico

Para la medición de las propiedades colorimétricas se usó un colorímetro (3nh[®]-NR110) y se determinaron los valores de los parámetros “L” (luminosidad), “a” (gradiente verde-rojo) y “b” (gradiente azul-amarillo) del espacio CIELab.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis estadístico de comparación de varianzas (ANOVA) seguido de un postest de Tukey para determinar diferencias estadísticas de los parámetros medidos.

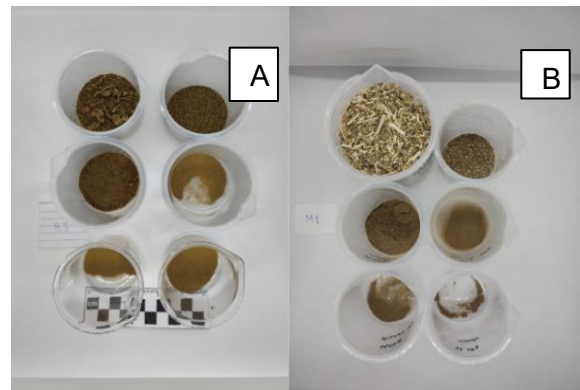


Figura 1: Fracciones tamizadas del material vegetal. A- Residuo floral y B- tallo.

Tabla 1: rendimiento de las fracciones granulométricas.

Rendimiento ensayo granulométrico		
Tamaño de partícula	Tallo	Inflorescencia
>840 micrones	81,33±6,06	63,63±5,51
>500 micrones	5,51±1,38	16,78±5,60
>149 micrones	8,40±2,89	10,30±0,73
>105 micrones	2,79±0,80	3,52±0,56
>74 micrones	1,23±0,62	2,08±0,87
<74 micrones	0,72±0,43	1,36±0,69

Resultados y discusión

El tamizado del material vegetal permitió separar el residuo vegetal en diferentes fracciones. En la Tabla 1 se observa el

rendimiento porcentual de las distintas fracciones. En ambas matrices vegetales la fracción > a 840 micrones fue la de mayor rendimiento. A partir de los tallos se obtuvo un rendimiento de $81,33 \pm 6,06$ % y a partir de los residuos de inflorescencias $63,63 \pm 5,51$ %. El pretratamiento mecánico utilizado produce principalmente partículas de fracción “gruesa” en tallos e inflorescencias.

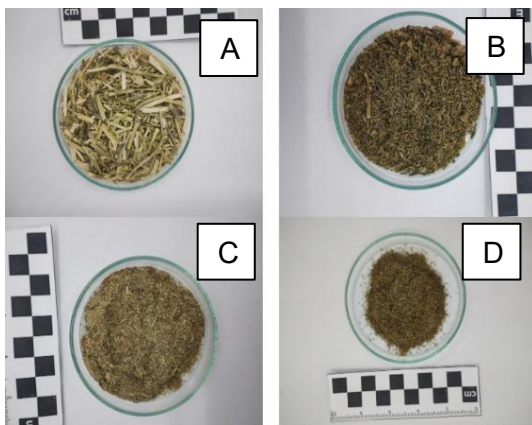


Figura 2: Imagen que muestra las fracciones obtenidas luego del proceso de molienda y tamizado **A-** tallo mayor a 840 micrones, **B-** inflorescencia mayor a 840 micrones. **C-** tallo menor a 840 micrones y **D-** inflorescencia menor a 840 micrones

Para la extracción de celulosa del tallo se trabajó con la matriz vegetal completa, sin realizar separación de corteza y médula (Viscusi y col., 2020; Hancock, 2023; Solis García y col., 2025; Rana y Gupta, 2020). Los tallos se procesaron en molinos a cuchillas seguido de un proceso de deslignificación más agresivo con el uso de altas temperaturas y presión (autoclave). La temperatura y el tratamiento mecánico y

químico pueden modificar las características de la fibra (Solis García y col., 2025; Viscusi y col., 2020) por lo que cada metodología de obtención debe analizarse con cuidado en contexto del proceso industrial que se persiga.

En el caso del residuo de inflorescencias, se trabajó sobre el material pretratado de manera mecánica sin ninguna otra preparación previa. En la Tabla 2 podemos ver el rendimiento de las extracciones de celulosa para las distintas fracciones. El mayor rendimiento de extracción de celulosa se obtuvo de la fracción “gruesa” del tallo, la misma presentó un rendimiento del 35%, mientras que la fracción “fina” fue del 12%. Para las inflorescencias se observó un rendimiento de extracción de celulosa del 15% para la fracción “gruesa” y 10% para la fracción “fina”. Los resultados obtenidos revelan que el tratamiento mecánico de molienda no requiere ser muy prolongado, ya que las partículas >840 micrones presentaron mayores rendimientos de extracción lo cual en un proceso a mayor escala implicaría reducción de costos de proceso.

Tabla 2: Rendimiento de extracción de celulosa. MV: Material vegetal.

Fracción	Rendimiento g/100g de MV porcentual
Tallo "grosso" (>840 micrones)	36,99±1,63
Tallo "fino" (<840 micrones)	12,05±1,20
Residuo floral "grosso" (>840 micrones)	15,23±0,68
Residuo floral "fino" (<840 micrones)	12,54±2,54

El análisis colorimétrico muestra claramente la efectividad de los métodos de remoción del material cementante del tejido vegetal junto con pigmentos y otros compuestos como las clorofilas, ya que se observó que los valores de L del material celulósico extraído fueron más altos que los de las matrices vegetales de partida. Valores elevados del parámetro L indican mayor luminosidad. Congruentemente con lo esperado el material celulósico extraído presentó valores de a y b cercanos a 0, indicando tonos claros.

Comparando los parámetros colorimétricos de las celulosas obtenidas de las diferentes matrices vegetales (Figura 3), comprobamos que el parámetro L fue ligeramente superior en las muestras de inflorescencias. La celulosa obtenida a partir de este material vegetal también presentó mayores valores en el parámetro b. La fracción "fina" del tallo presentó

mayores valores para los parámetros "b" y "a", esto puede deberse a una menor remoción de residuos de lignina y hemicelulosa como también a la producción de cromóforos por la exposición a un ambiente saturado de humedad y calor (autoclave) (Yatagai, 1994). Los análisis estadísticos muestran que los parámetros colorimétricos obtenidos de la fracción "fina" y "grosso" de tallos presentaron diferencias significativas. En cuanto a los resultados obtenidos para las fracciones "fina" del tallo y de inflorescencia muestran clara diferencia (Figura 3 y 4) separándose de las otras fracciones. Los resultados señalan que las celulosas obtenidas de los residuos de inflorescencias presentaron parámetros colorimétricos más homogéneos entre las fracciones, mientras que en el tallo depende de la fracción de partida.

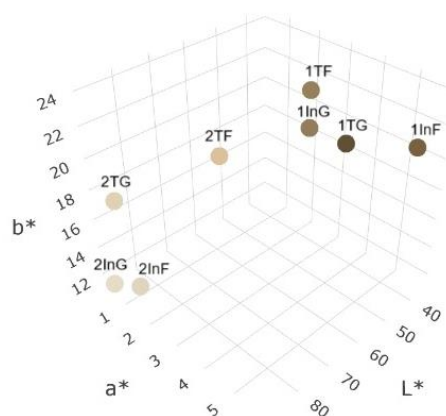


Figura 3: Gráfico 3 D de los parámetros colorimétricos: L, a, b, de los materiales de partida y las celulosas obtenidas. Referencias: 1: Muestras de tejido vegetal. 2: Muestras de celulosa. TG: tallo fracción gruesa. TF: tallo

fracción fina. InG: inflorescencias fracción gruesa. InF: inflorescencia fracción fina.

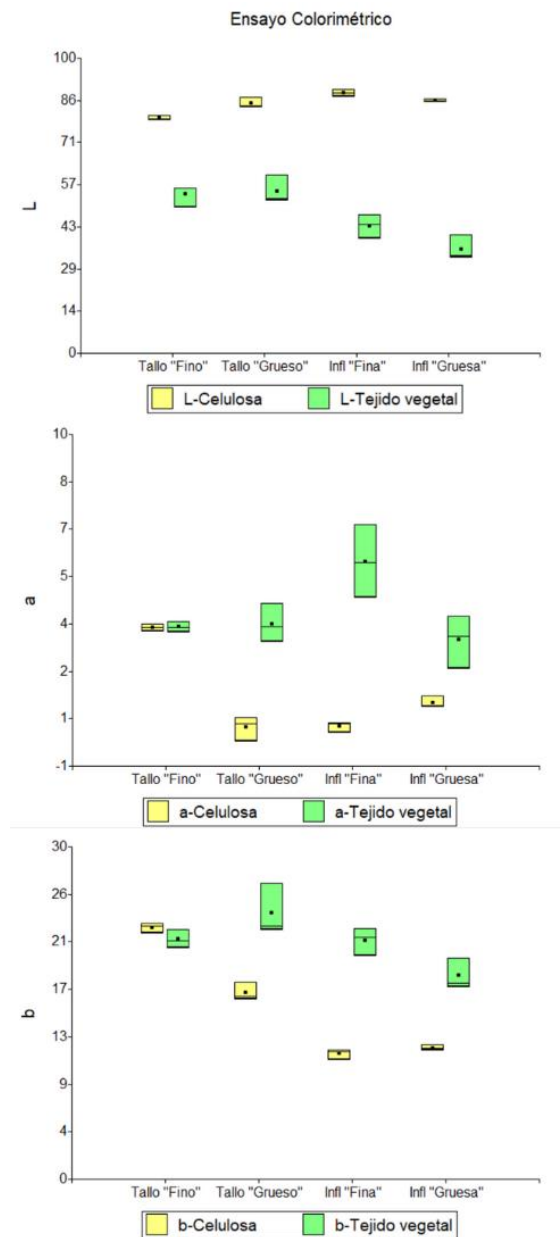


Figura 4: gráficos box-plot de los resultados del análisis colorimétrico en orden descendente para L, a y b.

Conclusión

Los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que un pretratamiento mecánico moderado del material vegetal realizado

con un molino de cuchillas, con partículas resultantes de tamaño >840 micrones permiten mejorar el rendimiento de extracción de celulosa de tallo e inflorescencias de *Cannabis* medicinal. Por otro lado, se observó que la calidad de la celulosa extraída de residuos de inflorescencia presenta mejores parámetros colorimétricos (luminosidad y color). Se hacen necesarios realizar análisis de las propiedades fisicoquímicas de las fibras obtenidas a los efectos de determinar a qué producto final se adecúa mejor la celulosa obtenida.

Bibliografía

Cannabidiol market size and share industry report, 2030. (n.d.). Recuperado de <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/cannabidiol-cbd-market>

Chacon, F. T., Raup-Konsavage, W. M., Vrana, K. E. & Kellogg, J. J. (2024). Effect of Hemp Extraction Procedures on Cannabinoid and Terpenoid Composition. *Plants*,13(16), 2222.

Corda, A., Cortés, E., & Piñol Arriagada, D. (2019). Cannabis en Latinoamérica: la ola verde y los retos hacia la regulación. *Djusticia*.

Crini, G., Lichtfouse, E., Chanet, G., & Morin-Crini, N. (2020). Applications of hemp in textiles, paper industry, insulation and building materials, horticulture, animal nutrition, food and beverages, nutraceuticals, cosmetics and hygiene, medicine, agrochemistry, energy production and environment: a review.

Environmental Chemistry Letters, 18(5), 1451-1476.

Ferreira, F. G. (2022). Despenalización del uso personal de cannabis en América Latina: un aporte para su medición y análisis. *Revista electrónica de estudios latinoamericanos*, 20 (79).

García, H. S., Iguasnia, B. S., De la Rosa Martínez, A., Espín, D. M., Crisanto, S. S., Benavides, K. C., Castillo, G. G., Benitez, D. G. & Benavidez, K. C. (2025). Extracción de fibras de celulosa del tallo de cáñamo (*Cannabis sativa* L.) mediante tratamiento químico para su aplicación textil. *Perfiles*, 1(33), 24-35.

Hancock, J., Osei-Bonsu, R., Hoque, M., Samuels, L., & Foster, E. J. (2023). Valorization of cannabis green waste to cellulose nanomaterials via phosphoric acid hydrolysis. *Industrial Crops and Products*, 201, 116888.

Lazarjani, M. P., Young, O., Kebede, L., & Seyfoddin, A. (2021). Processing and extraction methods of medicinal cannabis: a narrative review. *Journal of cannabis research*, 3(1), 32.

Moonart, U., & Utara, S. (2019). Effect of surface treatments and filler loading on the properties of hemp fiber/natural rubber composites. *Cellulose*, 26(12), 7271-7295.

Patil, R. (2025). Medical cannabis market size grows at 13.8% of CAGR by 2034. Recuperado de <https://www.towardshealthcare.com/insights/medical-cannabis-market-size>

Pawar, R. (2025) Informe de crecimiento y tamaño del mercado de compuestos de cannabis medicinal para 2037. Recuperado de <https://www.researchnester.com/es/reports/medicinal-cannabis-compounding-market/7662>

Pérez, J. A., Franco, J. M., & Benítez Benítez, R. (2023). Biomasa residual de industria del Cannabis, una alternativa para la obtención de productos de alto valor agregado. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 25(1), 92-103.

Peterson, E. (2019). Industry report: the state of hemp and cannabis waste. *US Manufacturing Report*. Recuperado de <https://usmanufacturingreport.com/article/industry-report-the-state-of-hemp-and-cannabis-waste/>.

Rana, S. S., Gupta M. K. Isolation of nanocellulose from hemp (*Cannabis sativa*) fibers by chemo-mechanical method and its characterization. *Polymer Composites*. 2020; 41:5257–5268.

Robertson, K. J., Brar, R., Randhawa, P., Stark, C., & Baroutian, S. (2023). Opportunities and challenges in waste management within the medicinal cannabis sector. *Industrial Crops and Products*, 197, 116639.

Viscusi, G., Barra, G., & Gorrasi, G. (2020). Modification of hemp fibers through alkaline attack assisted by mechanical milling: effect of processing time on the morphology of the system. *Cellulose*, 27(15), 8653-8665.



Yatagai, M., & Zeronian, S. H. (1994). Effect of ultraviolet light and heat on the properties of cotton cellulose. *Cellulose*, 1(3), 205-214.

35. Medio Ambiente y contaminación ambiental

Aplicación de biopelículas bacterianas para la remediación de sedimentos contaminados del Río Reconquista

Autor: Wanda Beltrán Email: wbeltran@estudiantes.unsam.edu.ar Co-autor(es): Gustavo Curutchet; Mariano Medina; Ana E. Tufo Orientador/a: Ana E. Tufo Email: atufo@unsam.edu.ar

Instituto: IIIA-UNSAM-CONICET, Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental, Escuela de Hábitat y Sostenibilidad, Campus Miguelete, 25 de mayo y Francia, 1650-San Martín, Provincia de Buenos Aires, Argentina

Resumen

Los sedimentos del río Reconquista (Prov. Bs As), especialmente en la localidad de Troncos del Talar, presentan elevados contenidos de materia orgánica, zinc (Zn), cobre (Cu) y cromo (Cr). En estudios previos se aislaron comunidades microbianas nativas azufre oxidantes (S-Ox): *Acidithiobacillus thiooxidans* y hierro oxidantes (Fe-Ox): *Acidithiobacillus ferrooxidans* para su uso en remediación por lixiviación, técnica que moviliza metales asociados a matrices minerales. El objetivo de este trabajo es optimizar los procesos de biorremediación de sedimentos contaminados mediante la aplicación de biopelículas de bacterias acidófilas nativas. Se caracterizó cinéticamente el crecimiento de ambas cepas y se realizaron ensayos en frascos agitados por 30 días, con pulpas al 5 y 10% de sedimento contaminado, utilizando biopelículas de S-Ox y Fe-Ox formadas sobre S⁰ (fuente de e⁻), respectivamente. Se monitoreó el pH, y la concentración de H⁺, Fe(II), Zn, Cu y Cr. En los sedimentos pre y post- biolixiviación se analizó la distribución de metales, materia orgánica y tamaño de partícula. Los resultados indican que la estrategia combinada de bioaumentación y bioestimulación con biopelículas, para ambos % de pulpa, acelera la acidificación (pH < 4 a los 4 días), frente a los 14 días en controles sin microorganismos, con tendencias similares en la reducción de H⁺ y Fe(II). Además, la extracción máxima alcanzó 25 % para Zn, 40 % para Cu y 44 % para Cr (5 % pulpa), y el Zn y Cu remanente se movilizaron hacia la fracción intercambiable. La lixiviación de Zn fue similar para ambos porcentajes de pulpa, mientras que Cu y Cr fueron más eficientes al 5 %. No obstante, para Zn resulta más conveniente 10 % de pulpa, por mayor sustentabilidad. En general, la movilización de metales hacia fracciones lábiles fue más marcada con menor densidad de pulpa. Como perspectiva futura, resta explorar alternativas sustentables para el tratamiento del lixiviado y la recuperación de metales.

Palabras clave: biorremediación, biopelículas, metales pesados.

Introducción

En los cursos de agua de llanura, especialmente en áreas cercanas a centros urbanos y periurbanos, la disminución del caudal superficial promueve la deposición de partículas. Esto da lugar a la acumulación de materiales de procedencia tanto natural como antropogénica, los cuales funcionan como portadores de contaminantes químicos y biológicos de carácter persistente y tóxico, asociados a distintas actividades humanas. Bajo estas condiciones, los sedimentos fluviales se convierten en un reservorio de riesgo para los ecosistemas acuáticos y la salud de las poblaciones expuestas. Si bien muchos de los contaminantes son de origen terrestre, su destino final suelen ser los cuerpos de agua, donde son transportados, depositados y retenidos en los sedimentos (Chen, Lin, & Zhuang, 2022). Entre las principales fuentes que contribuyen a esta carga contaminante se encuentran las emisiones de la combustión de combustibles fósiles, las pérdidas de aceites lubricantes con contenido metálico y el vertido de efluentes sin tratamiento provenientes de industrias como la galvanoplastia, el sector eléctrico, las curtiembres, las alimentarias, las químicas, las de pinturas y las fundiciones de metales no ferrosos, entre otras (Pescuma & Guaresmi, 1992; Mondino, 2007). Por ende, entre la gran variedad de componentes antropogénicos ingresados

al ambiente podemos encontrar algunos de elevada toxicidad y persistencia, entre los que se destacan los metales pesados. La solubilidad, toxicidad y biodisponibilidad de los metales pesados son resultado de procesos de oxidación-reducción y están sujetas, entre otros factores, a las condiciones de pH y presencia y concentración de ligandos en el medio. En dichos ambientes contaminados, también se dan las condiciones necesarias para una gran acumulación de materia orgánica en los sedimentos, por ejemplo, por la descarga de efluentes domiciliarios como las aguas grises (Tufo et al., 2021). Esto provoca un entorno anaeróbico donde las reacciones catalizadas por microorganismos generan grandes cantidades de sulfuros de metales pesados, que precipitan y se van depositando en los sedimentos (González-Fernández et al., 2011; Zhang et al., 2014; Zhang et al., 2016). Por lo tanto, el elevado contenido de materia orgánica induce a la acumulación de metales pesados posiblemente a través de la actividad microbiana (Park & Faivre, 2022; Su et al., 2022). Asimismo, en dichos microambientes ricos en nutrientes y contaminantes se generan presiones selectivas sobre las comunidades microbianas, promoviendo la expresión diferencial de especies y modificando la estructura de la microbiota sedimentaria (Vera, Schippers, & Sand, 2013). En este

contexto, debido a la actividad microbiana coordinada, por ejemplo, los microorganismos acidófilos son capaces de movilizar/inmovilizar metales a través de procesos de transformación de los minerales sulfurosos presentes en los sedimentos. Tales transformaciones son conocidas como procesos de biolixiviación cuando movilizan los metales desde la fase sólida hacia la solución, lo cual a su vez permite poder recuperar los metales valiosos (Jones & Santini, 2023). Estos procesos biocatalizados ocurren de manera natural en cualquier ambiente donde los minerales sulfurosos, presentes en los sedimentos contaminados, quedan expuestos tanto al agua como al oxígeno, contribuyendo a la contaminación del agua (Johnson & Hallberg, 2005). Un ejemplo claro de este tipo de ambientes se encuentra en el río Reconquista (Provincia de Buenos Aires), específicamente en la localidad de Troncos del Talar ($34^{\circ} 26' 59,6''$ S; $58^{\circ} 35' 45,3''$ O). En estudios previos del grupo de trabajo, los sedimentos de este sitio han sido caracterizados en detalle (Medina et al., 2025), encontrándose que presentan características típicas de una degradación ambiental significativa, especialmente reflejada en el elevado contenido de materia orgánica (MO: $183 \pm 3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) y de metales pesados como Zn, Cu y Cr ($700 \pm 50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; $100 \pm 20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; $290 \pm 5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectivamente). Estos valores

difieren notablemente de los observados en un sitio con menor grado de contaminación, ubicado al inicio del río Reconquista en la zona de Dique Ingeniero Carlos Francisco Roggero, utilizado como control (MO: $40 \pm 5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; Zn: $77 \pm 2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Cu $< 0,3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; Cr: $9 \pm 3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) (Medina et al., 2025). En este tipo de entornos impactados por los contaminantes, las comunidades bacterianas pueden adherirse a los minerales a través de la generación de biopelículas, un mecanismo que les otorga mayor capacidad de adaptación frente a condiciones ambientales desfavorables (Fomina et al., 2020). A partir de esto, y los resultados obtenidos, es que Medina et al., aisló comunidades microbianas acidófilas nativas, en particular, hierro oxidantes (Fe-Ox) y azufre oxidantes (S-Ox), con el fin de evaluar su potencial actividad en procesos de remediación por lixiviación (Medina et al., 2025). Asimismo, pudo comprobar que ambas comunidades microbianas acidófilas son capaces de formar biopelículas sobre partículas de azufre elemental, utilizándolo como fuente de electrones. En este contexto, la utilización de biopelículas de azufre pre-colonizadas para inocular los ensayos de remediación podría favorecer el establecimiento inicial de las comunidades S-Ox y Fe-Ox, acelerando la generación de condiciones ácidas y, en consecuencia, incrementando la movilización de metales.

Objetivos

Comprender las interrelaciones entre las comunidades microbianas, los sedimentos y los contaminantes es fundamental para el diseño de procesos de biorremediación. En este marco, el objetivo de este trabajo es optimizar la remediación de sedimentos mediante la aplicación de biopelículas de bacterias acidófilas nativas.

Materiales y Métodos

Cinética de crecimiento de las comunidades bacterianas

El conocimiento de la cinética de crecimiento de las comunidades bacterianas acidófilas, que serán utilizadas en los procesos de biolixiviación, resulta de gran utilidad para favorecer el crecimiento óptimo. Estas comunidades fueron aisladas del sedimento contaminado Troncos del Talar, es decir, se trabajó con bacterias nativas del sedimento a biorremediar. Se utilizó medio 0K suplementado con azufre (S) elemental (0K+S) para las comunidades azufre-oxidantes y medio 9K para las comunidades hierro-oxidantes. Se inocularon 5 mL del stock de cada comunidad bacteriana en matraces Erlenmeyer estériles de 250 mL que contenían 100 mL del medio correspondiente, incubándose a 25°C bajo condiciones estériles con agitación continua en agitador orbital a 110 rpm. En el caso del medio 0K+S, la incubación

se mantuvo hasta alcanzar la máxima acidez (titulación ácido-base con NaOH 0,0215 M) y el pH mínimo; mientras que en el medio 9K se prolongó hasta la completa oxidación del Fe²⁺ (titulación con KMnO₄ 2x10⁻⁴ M). En ambos casos se midieron en diferentes intervalos de tiempo la variación de pH, acidez y el crecimiento bacteriano (cel.mL⁻¹) mediante microscopía de campo claro y recuento en cámara de Neubauer; adicionalmente, para Fe-Ox se midió la concentración de Fe²⁺, mientras que para S-Ox no se incluyó este parámetro por no formar parte de su metabolismo. El mismo procedimiento se llevó a cabo para los controles sin inocular.

Ensayos de biolixiviación de metales pesados

Formación de las biopelículas de las comunidades acidófilas nativas

A partir de cada una de las comunidades S-Ox y Fe-Ox aisladas y caracterizadas, se realizaron distintos repiques en medio fresco hasta obtener aproximadamente 1x10⁷ cel.mL⁻¹. En el caso de las S-Ox se crecieron en medio 0K más azufre elemental (S), y luego se concentraron las bacterias a través de filtrado con membrana de 0,22 µm. Las Fe-Ox, fueron crecidas en medio 9K y también se concentraron por filtración. Una vez alcanzada la concentración deseada de ambas comunidades (aproximadamente 10⁷ cel.mL⁻¹), se resuspendieron en medio

de cultivo 2K (medio de cultivo mineral con Fe^{2+} como sustrato) con el agregado de S como fuente de e^- . Este nuevo cultivo inoculado con ambas comunidades se dejó crecer durante 7 días. Luego por decantación se recuperaron las partículas de S, las cuales fueron colonizadas por biopelículas de las comunidades microbianas. Es a este complejo azufre-biopelícula al que denominamos de aquí en adelante como "S pre-colonizado".

En todos los ensayos se procuró mantener el pH inicial por debajo de 4,0, a fin de garantizar el crecimiento óptimo de los microorganismos. En aquellos casos en que el potencial de neutralización de los sedimentos elevó el pH por encima de este valor, se adicionó el volumen necesario de H_2SO_4 (dilución 1:10) para restablecerlo.

Frascos agitados – escala laboratorio

Cada sistema experimental se realizó en matraces Erlenmeyer de 250 mL ("frascos agitados"), conteniendo un volumen final de 100 mL de medio de cultivo 2K ajustado a un pH inicial de 1,8. A cada sistema se incorporó la masa correspondiente de sedimento a remediar y, con el propósito de bioestimular el crecimiento de las comunidades Fe-Ox y S-Ox, favorecer la formación de *biofilms* sobre los minerales y acelerar la acidificación, se adicionaron las biopelículas de azufre elemental previamente colonizado como se describió anteriormente, en una proporción del 5%

respecto al contenido de pulpa. De manera complementaria, se agregaron inóculos de cultivos bacterianos de ambas comunidades hasta alcanzar una concentración de 10^7 cel.mL⁻¹ en solución para cada una.

Con el fin de evaluar las variables operativas a optimizar, se ensayaron diferentes densidades de pulpa: 5 y 10% (p/v), equivalentes a 5 g y 10 g de peso seco del sedimento a remediar. Cada sistema experimental contó con sus respectivos controles: control sin inóculo y control sin sedimento. Cabe destacar que los controles sin inocular sí contaron con el agregado de medio de cultivo 2K, de manera que las comunidades microbianas autóctonas de los sedimentos pudieran ser bioestimuladas.

Finalmente, los ensayos se mantuvieron en agitación continua durante 28 días a 110 rpm, de condición que da origen a la denominación "frascos agitados".



Figura 1. Ensayos de biolixiviación en matraces Erlenmeyer de 250 mL, con sedimentos de Troncos del Talar al 5% y 10% (p/v), controles y cultivos bacterianos Fe-Ox y S-Ox en medio 2K inoculados con azufre pre- colonizado.

VARIABLES MONITOREADAS

En la solución:

Con el fin de monitorear el crecimiento bacteriano en solución y analizar cambios fisicoquímicos, se tomaron alícuotas durante los primeros días y, posteriormente, de forma semanal. En ellas se determinaron pH, acidez (H^+) y Fe^{2+} (en medio 2K). Además, la concentración de metales pesados (Zn, Cu y Cr) se midió de manera quincenal mediante espectroscopía de absorción atómica, a fin de analizar la dinámica de lixiviación en el tiempo. El porcentaje de metales lixiviados se calculó normalizándolo por la concentración inicial total de cada metal presente en un kilogramo del sedimento de Troncos del Talar.

En el sedimento:

A partir de las muestras de sedimento, tanto en etapas previas como posteriores al tratamiento, se evaluaron los siguientes parámetros: contenido de humedad, contenido de materia orgánica, potencial redox (ORP), pH, contenido total y distribución de metales.

El contenido de humedad se determinó por gravimetría. Para ello, las muestras húmedas se colocaron en estufa a $80^{\circ}C$ durante 24 a 48 h. Una vez secas, se conservaron en un desecador con humedad controlada y, a partir de la diferencia de masa respecto al peso seco,

se calculó el % de humedad. Es importante señalar que la temperatura de $80^{\circ}C$ se mantuvo con el fin de evitar alteraciones en las fases minerales arcillosas presentes en los sedimentos, garantizando así la comparabilidad de los resultados con otros estudios realizados por el grupo.

El contenido de materia orgánica se determinó mediante el método de pérdida por ignición. Para ello, las muestras húmedas se colocaron en crisoles de porcelana, registrando su peso inicial. Posteriormente, se secaron en estufa hasta alcanzar peso constante y luego se calcinaron en mufla a $550^{\circ}C$ durante 9 h. Una vez enfriadas a temperatura ambiente en desecador, se registró nuevamente el peso. La diferencia entre la masa inicial y la masa tras la calcinación permitió estimar la fracción de materia orgánica perdida por volatilización y, a partir de ella, calcular el porcentaje de materia orgánica (%MO). Las determinaciones de pH y ORP se realizaron utilizando electrodos de punta cónica sobre el sedimento húmedo (St. Analysis).

El contenido total y la distribución de metales como Zn, Cu y Cr en el sedimento (en su estado de humedad original) se analizó utilizando un procedimiento estándar de extracción secuencial de metales BCR (Comunidad Europea de Referencia, Comisión de las Comunidades Europeas) (Ure et al., 1993). La extracción se llevó a cabo en cuatro etapas sucesivas,

previamente estandarizadas por el grupo de trabajo y descritas en detalle en estudios anteriores (Di Nanno, 2007; Porzionato, 2016; Grimolizzi, 2019):

I) Extracción en 0,11 M de ácido acético:

Se pesaron entre 1 y 2 g de sedimento (equivalente a 1 g de peso seco) y se mantuvieron en agitación durante 16 h en 40 mL de ácido acético 0,11 M, a 70 rpm y temperatura ambiente. Posteriormente, el sobrenadante se separó por centrifugación (Sigma 3-18K) a 1500 rpm durante 15 min y se almacenó a 4 °C. Las muestras sólidas se enjuagaron con agua destilada y se repitió la centrifugación, adicionando este sobrenadante al obtenido en la primera extracción. El volumen total extraído se filtró a través de una membrana de 0,22 μm y se ajustó a 50 mL en matraz aforado. La fracción obtenida corresponde a los metales asociados a carbonatos, metales solubles en agua y ácido y metales intercambiables. Se denomina *Fracción Intercambiable* (F1).

II) Extracción en 0,1 M de cloruro de hidroxilamina, acidificada a pH 2 con HNO_3 destilado: A partir del pellet recuperado del paso I) se agitó por 16 h en 40 mL de hidroxilamina 0,1 M a pH 2. Se centrifugó, enjuagó y almacenó el sobrenadante de igual manera que para la primera fracción (filtrado por membrana de 0,22 μm y se ajustó a 50

mL en matraz aforado). Esta fracción corresponde a los metales asociados a óxidos de Fe y Mn. Se denomina *Fracción Reducible* (F2).

III) Extracción por acetato de amonio 1

M (pH 2) post oxidación con H_2O_2 30%: Se añadieron 10 mL de H_2O_2 30% sobre el pellet recuperado en el paso II), se dejó reaccionar durante una hora a temperatura ambiente, agitando manualmente durante intervalos cortos de tiempo. Se continuó la oxidación durante una hora en estufa a 85°C, manteniendo la agitación manual durante la primera media hora. Luego, se redujo el volumen de la mezcla por evaporación, hasta 3 mL, en baño maría a 100°C bajo campana. Posteriormente, se añadieron nuevamente 10 mL de H_2O_2 30% y se dejó reaccionar durante una hora a 85°C, con agitación manual durante la primera media hora. Finalmente, se dejó evaporar hasta obtener un volumen de 1 mL y se dejó enfriar. Finalmente, sobre este concentrado se adicionaron 40 mL de acetato de amonio 1 M a pH 2 y se lo dejó agitado durante 16 h. Se repitió el proceso de separación, lavado del pellet, filtrado por 0,22 μm y almacenamiento de sobrenadante al igual que en los pasos anteriores. Esta fracción corresponde a metales asociados a materia orgánica y sulfuros. Se denomina *Fracción Oxidable* (F3).

IV) Extracción con HNO₃ concentrado destilado: Se resuspendió el pellet obtenido en 10 mL HNO₃ concentrado durante una hora a 30 rpm. El sólido fue separado por centrifugación por filtración con papel de filtro a granel, enjuagando con agua destilada. Finalmente se filtró la solución con membrana de 0,22 μm y se ajustó el volumen final a 50 mL en matraz aforado. Durante este paso se obtienen en solución los metales asociados a componentes más recalcitrantes que no fueron extraídos en los pasos anteriores. Se denomina *Fracción Residual (F4)*.

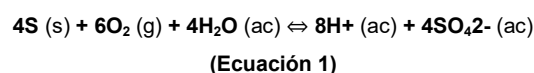
La concentración de metales en las soluciones obtenidas de cada fracción se determinó mediante Espectrometría de Absorción Atómica con llama aire-acetileno (EAA). El contenido total se calculó como la suma de las concentraciones medidas en todas las fracciones extraídas.

Resultados y Discusión

Cinética de crecimiento de las comunidades bacterianas

La Figura 2 muestra el comportamiento de las comunidades S-Ox. El recuento celular indica que estas comunidades presentan una fase de latencia que se extiende hasta las 72h, seguida de una fase exponencial que se mantiene hasta las 216h, momento en el cual alcanzan la fase estacionaria,

para posteriormente decrecer en la fase de muerte. Durante este período, se observa un aumento progresivo de la acidez y una disminución del pH, en contraste con los controles que permanecen prácticamente inalterados. Este comportamiento es consistente con el metabolismo de las comunidades S-Ox, que, a medida que crecen, oxidan el sustrato de S y acidifican el medio, como se representa en la Ecuación 1 (Porzionato, 2016).



En el caso de las comunidades Fe-Ox (Figura 3), se observa una tendencia similar en el recuento pero con un crecimiento mucho más rápido. La fase de latencia ocurre hasta las 24h, seguida de una fase exponencial que se extiende hasta las 72h, alcanzando la fase estacionaria, y posteriormente un descenso abrupto durante la fase de muerte a partir de las 216 horas. La relación acidez-pH presenta un comportamiento más complejo de interpretar. Inicialmente, tanto la acidez como el pH aumentan (aproximadamente hasta las 3 horas), debido a que el Fe²⁺ se oxida por el metabolismo de las Fe-Ox, ver Ecuación 2 (Porzionato, 2016), consumiéndose los protones del medio y generando un aumento del pH. Sin embargo, al calcular la acidez mediante titulación con NaOH, esta reacciona con el

Fe^{3+} presente en solución, favoreciendo el aumento de la acidez. A medida que se oxida la mayor parte del Fe^{2+} , comienza a predominar la hidrólisis del Fe^{3+} (Ecuación 3), aumentando la concentración de protones y disminuyendo el pH.

La posterior disminución de la acidez se debe a la precipitación de Fe^{3+} en forma de óxidos de hierro, reduciendo su concentración en solución.

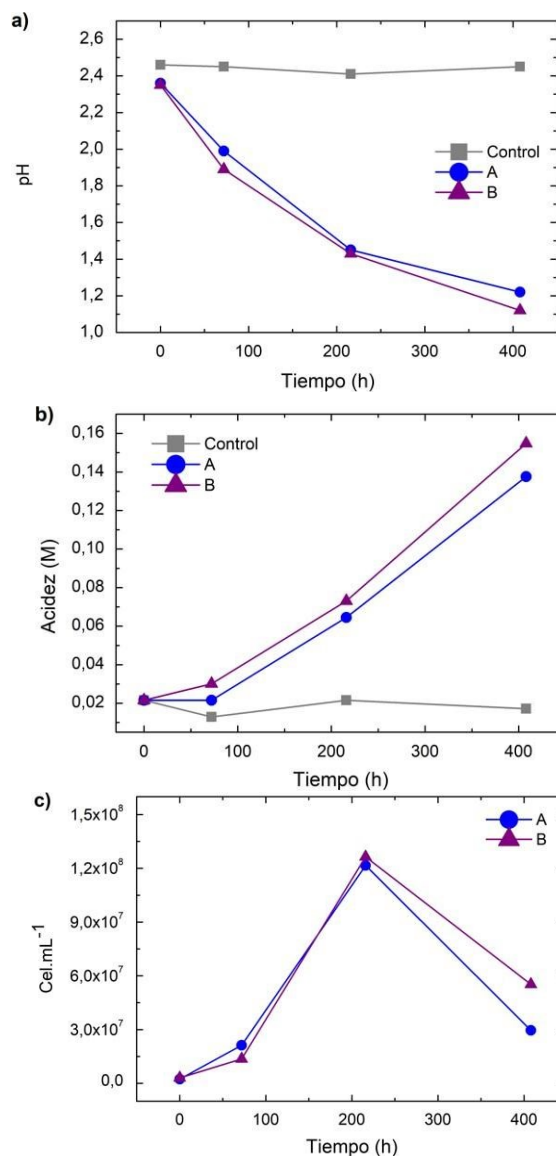
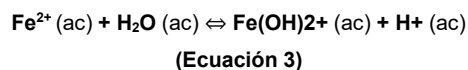
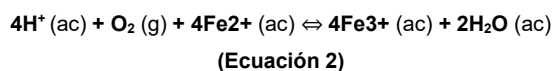


Figura 2. Cinética de crecimiento de las comunidades S-Ox (-●- A y -▲- B) y su respectivo Control sin inocular (-■- Control). **(a)** Variación del pH, **(b)** acidez, **(c)** concentración celular.

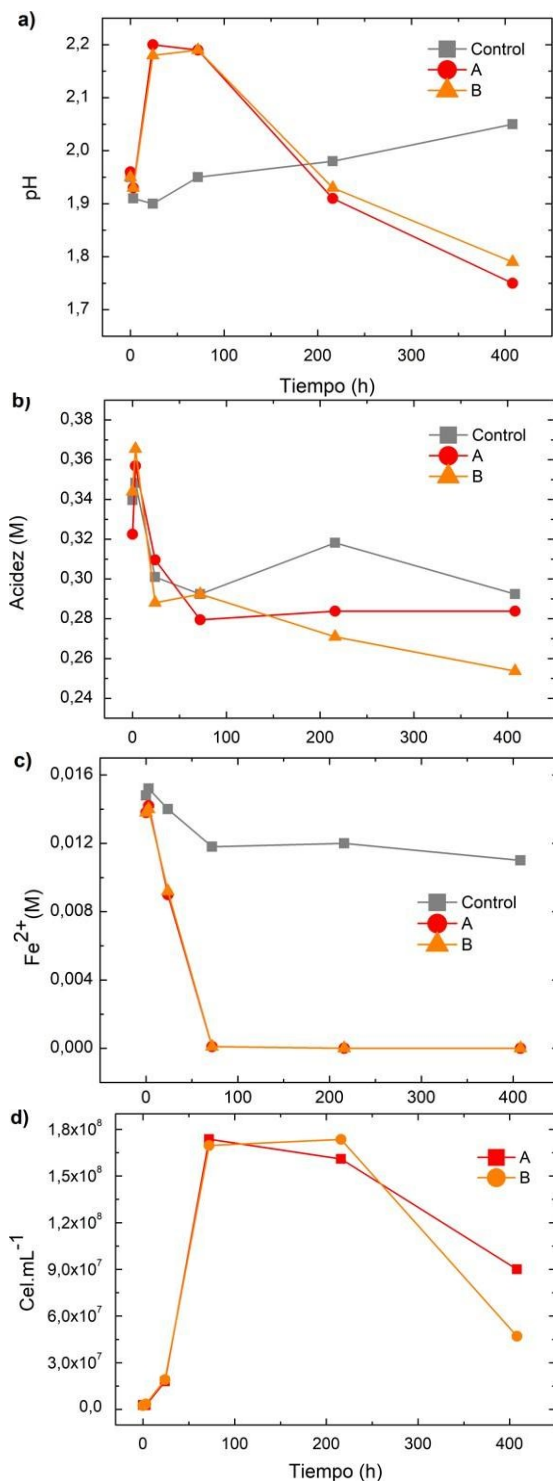


Figura 3. Cinética de crecimiento de las comunidades Fe-Ox (-●- A y -▲- B) y su respectivo Control sin inocular (-■- Control). **(a)** Variación del pH, **(b)** acidez, **(c)** concentración de Fe²⁺, **(d)** concentración celular.

Ensayos de biolixiviación de sedimentos Parámetros de crecimiento

Los gráficos presentados en la Figura 4 muestran la variación del pH, la acidez y el Fe²⁺ en solución a lo largo del tiempo. Estos parámetros exhiben tendencias similares a las reportadas en la sección anterior, "Cinética de crecimiento de las comunidades bacterianas", particularmente a las observadas en las comunidades Fe-Ox, debido a la influencia del hierro en solución. De esta manera, se pudo comprobar que hubo un crecimiento óptimo de las comunidades bacterianas en los ensayos.

Al comparar los ensayos inoculados con los controles no inoculados, se observaron comportamientos similares en las curvas, en contraste con el control sin sedimento. Esto indica que, aún sin inoculación, las comunidades bacterianas hierro y azufre-oxidantes nativas del sedimento son capaces de desarrollarse bajo las condiciones empleadas, caracterizadas por pH ácido y disponibilidad de sustratos de Fe y S; es decir, estas comunidades pueden ser bioestimuladas. Esta observación resulta coherente si se considera que las comunidades bacterianas estudiadas fueron originalmente aisladas del mismo sedimento (proveniente de la zona Troncos del Talar).

No obstante, los sistemas que recibieron tanto bioestimulación como bioaumento,

mediante la inoculación de biopelículas de azufre pre-colonizados y cultivos bacterianos de S-Ox y Fe-Ox, mostraron un efecto positivo claramente definido. Como se observa en las Figuras 4a y 4b, el sistema inoculado (*inoc.*), es decir bioestimulado y bioaumentado, presentó una aceleración en la acidificación, un pH más bajo en las etapas iniciales y un mayor consumo de Fe²⁺ en comparación con el sistema sin inocular, que solo fue bioestimulado. Estos resultados evidencian que la combinación de bioestimulación y bioaumento favorece significativamente la actividad metabólica de las comunidades bacterianas, potenciando los procesos de biolixiviación en los sedimentos.

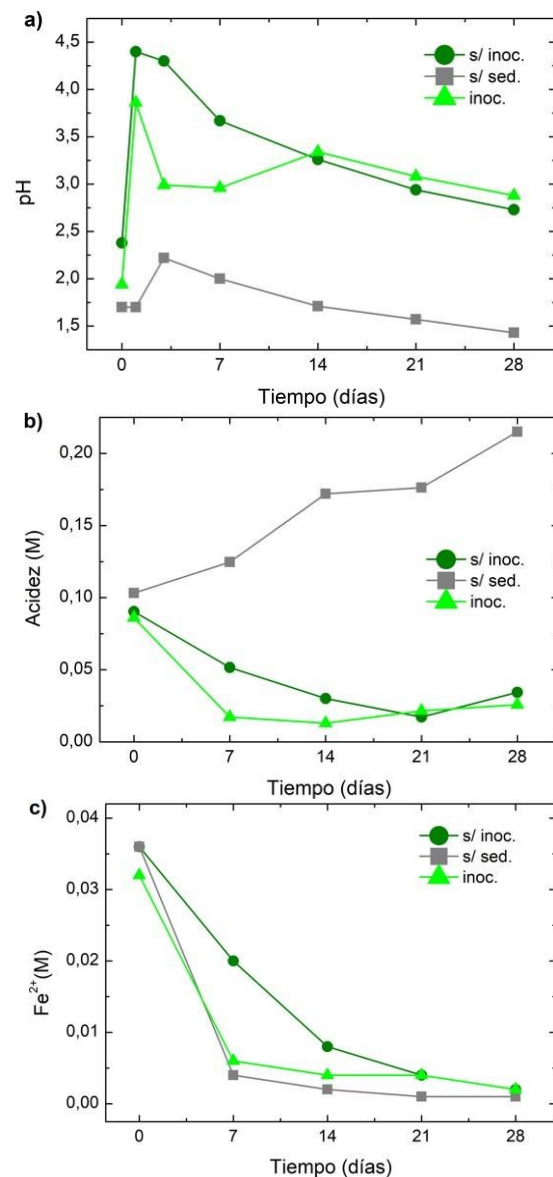


Figura 4. Variación del pH (a), acidez (b) y concentración de Fe²⁺ (c) en solución a lo largo del tiempo para las distintas condiciones experimentales. Control en ausencia de sedimento (-■- s/ sed); Control sin inocular (-●- s/inoc.) corresponde a los controles sin inocular; y Control de los sistemas con inóculos de las comunidades Fe-Ox y S-Ox (-▲- Inoc).

Biolixiviación de metales pesados

En líneas generales, el mayor porcentaje de extracción de metales (Zn, Cu y Cr) se alcanzó en el último día del experimento, es decir, el día 28. La Figura 5 ilustra esta tendencia para el Zn.

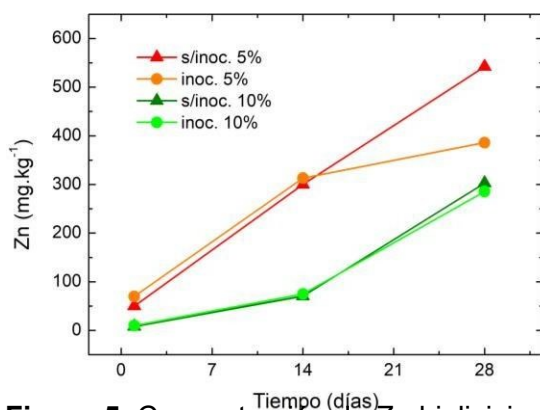


Figura 5. Concentración de Zn biolixiviado a diferentes porcentajes de pulpa (5% y 10%), normalizada por kilogramo de sedimento en peso seco, en función del tiempo. *s/inoc.* (-▲- y -▲-) corresponde a los controles sin inocular, mientras que *Inoc.* (-●- y -●-) hace referencia a los sistemas con inóculos de las comunidades Fe-Ox y S-Ox .

La Tabla 1 muestra las concentraciones de metales en los lixiviados correspondientes al día de máxima lixiviación, alcanzada al finalizar la experiencia, mientras que la Figura 6 muestra el porcentaje de metal extraído sobre la cantidad inicial que había en el sedimento. Como se puede observar, para ambos porcentajes de pulpa (5 y 10%), no se registraron diferencias significativas en la extracción de metales entre el control sin inocular y los ensayos inoculados. Esto coincide con lo observado previamente en la sección “*Parámetros de crecimiento*” y sugiere que, incluso sin inoculación externa, el agregado de medio de cultivo estimula el crecimiento de las comunidades microbianas nativas presentes en el sedimento (Wu et al., 2023). Esta observación es consistente con el hecho de que las bacterias utilizadas en este estudio fueron aisladas del propio sedimento y enriquecidas en medios con los mismos sustratos (Fe²⁺ y S).

Tabla 1. Concentración de metales biolixiviados en solución, normalizados por kilogramo de sedimento en peso seco, para cada condición experimental a diferentes porcentajes de pulpa (5 y 10 %). Se muestran los resultados de los controles sin inocular y de los sistemas con inoculados de las comunidades Fe-Ox y S-Ox más el agregado de S pre-colonizado.

Condición experimental (t: 28 días)	Zn (mg.Kg ⁻¹)	Cu (mg.Kg ⁻¹)	Cr (mg.Kg ⁻¹)
Control sin Inocular (5% pulpa)	542,2 ± 0,4	58,25 ± 0,01	87,829 ± 0,002
Inoculado (5% pulpa)	386 ± 1	57,208 ± 0,004	197,917 ± 0,001
Control sin Inocular (10% pulpa)	302,6 ± 0,4	6,86 ± 0,01	5,412 ± 0,002
Inoculado (10% pulpa)	322 ± 1	4,366 ± 0,004	3,908 ± 0,001

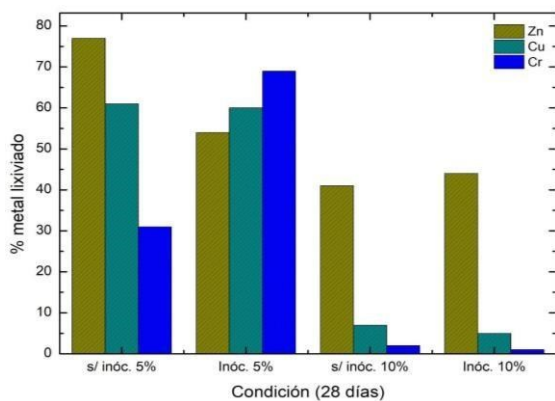


Figura 6. Porcentaje de Zn, Cu y Cr extraídos en los lixiviados con respecto a la cantidad inicial de cada metal presente en el sedimento contaminado de Troncos del Talar, en función de las condiciones experimentales con diferentes porcentajes de pulpa (5% y 10%), al día 28 (finalización del ensayo). Se muestran los Sistemas inoculados con las comunidades Fe-Ox y S-Ox (*Inóc. 5%* y *Inóc. 10%*) y sus respectivos Controles sin inocular (*s/inóc 5%* y *s/inóc 10%*).

El Zn fue el único metal cuya extracción no presentó diferencias considerables al variar los porcentajes de pulpa. En cambio, para Cu y Cr, la extracción fue mayor con un 5% de pulpa. Esto concuerda con diversos estudios que señalan que un menor porcentaje de pulpa favorece la lixiviación, ya que un mayor contenido de sedimento puede incrementar la competencia de los componentes de la matriz con los agentes lixiviantes en solución o reducir la actividad microbiana al limitar el acceso al oxígeno (Rouchalova et al., 2020; Pradhan, 2021). No obstante,

para la extracción de Zn, resulta más conveniente emplear un 10% de pulpa, ya que un mayor cociente sedimento/volumen reduce el consumo de reactivos y mejora la sustentabilidad del método.

Como se detalla en la sección de “*Materiales y Métodos*”, la extracción secuencial permite identificar la distribución de los metales en los distintos compartimentos que constituyen los sedimentos, en función de la fracción en la que son extraídos. Los resultados correspondientes a cada condición estudiada se presentan en la Figura 7, para el sedimento TT sin tratamiento, el inoculado y el control no inoculado, así como las variaciones en los porcentajes de pulpa (5% y 10%).

Para el Zn (Figura 7a), se observa que inicialmente el metal se encontraba predominantemente en las fracciones reducible y oxidante (F2 y F3, respectivamente) y en menor medida en la fracción residual (F4). Luego del tratamiento de biolixiviación por la inoculación con las biopelículas de azufre (S pre-colonizado), el Zn remanente en los sedimentos, es decir que no fue lixiviado a solución, se movilizó mayoritariamente hacia la fracción intercambiable (F1). Esto sugiere que, aunque no haya sido lixiviado, el proceso biocatalizado por la actividad microbiana ha provocado una relocalización del Zn hacia componentes del sedimento más lábiles como lo es la

fracción intercambiable (F1). Esto indica que el metal aún retenido en la matriz del sedimento está más susceptible de poder ser movilizado. Este comportamiento fue similar tanto en el ensayo inoculado como en su control sin inocular, siendo más significativo en el ensayo de 5%. En el caso del 10% de pulpa, aunque también se observó redistribución hacia la fracción intercambiable y parcialmente hacia la reducible, una porción significativa permaneció. Es necesario destacar, que en estos ensayos con mayor contenido de sedimentos el efecto del sistema inoculado es más significativo respecto del control sin inocular, ya que los metales fueron movilizados en mayor medida a la fracción intercambiable.

En cuanto al Cu (Figura 7b), inicialmente se encontraba en las fracciones oxidante y residual (F3 y F4, respectivamente). Tras los tratamientos, el metal que no fue lixiviado a solución se movilizó hacia la fracción intercambiable (F1) en el caso de 5% de pulpa, reduciéndose su contenido en las fracciones reducible y residual, sin presentar diferencias con el control sin inocular. En el caso de los ensayos con 10% de pulpa, tampoco se observan cambios significativos respecto del control y parece existir una relocalización del metal también hacia la fracción intercambiable y en menor medida a la reducible, pero a diferencia del 5% se ve un efecto de concentración hacia la fracción residual.

El Cr (Figura 7c) inicialmente se encontraba casi en su totalidad en la fracción oxidante (F3). Con el tratamiento tanto con 5%, así como con el 10% de pulpa, no fueron observadas diferencias apreciables entre el ensayo inoculado con las biopelículas como sus respectivos controles sin inocular. El contenido de Cromo remanente en los sedimentos fue movilizado solo en un 30% en los ensayos con menor % de pulpa hacia la fracción intercambiable (F1), mientras que con 10% no se evidenció movilización apreciable.

En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto la movilización de metales generada por la acción bacteriana en los sedimentos, tanto por la estimulación de las comunidades presentes en los sedimentos contaminados (controles sin inocular) como en los ensayos inoculados con biopelículas de azufre pre-colonizadas; sin embargo, esta movilización no alcanzó la magnitud esperada.

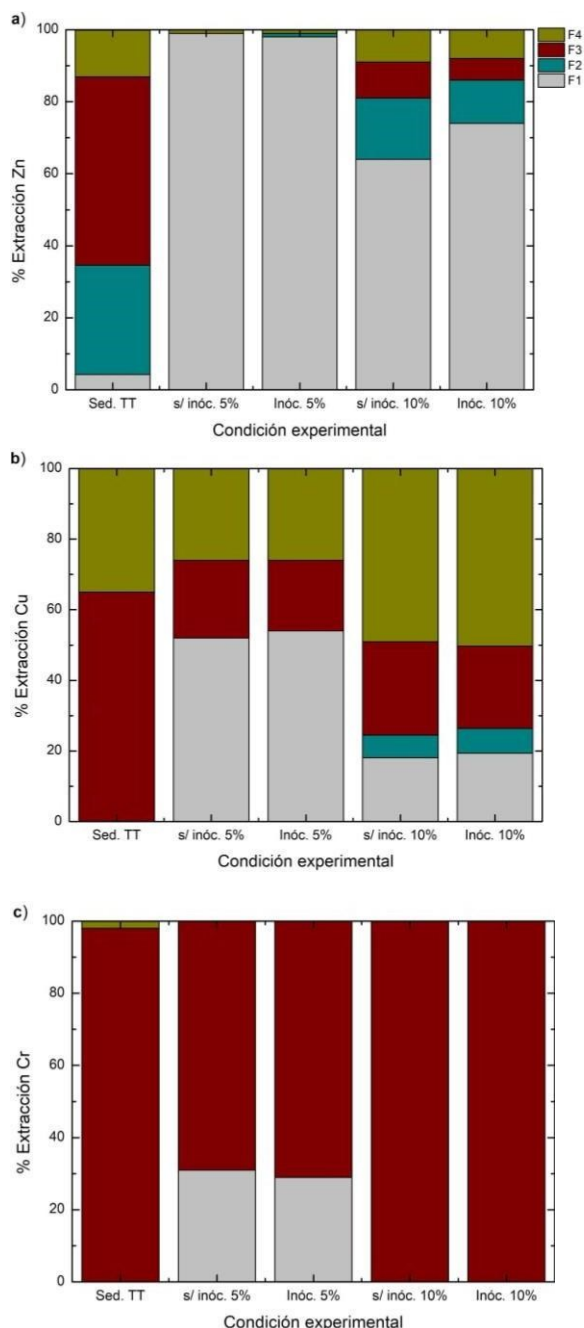


Figura 7. Distribución porcentual de metales pesados en sedimentos pre y post-biolixiviación. Porcentaje (%) de **a)** zinc (Zn), **b)** cobre (Cu) y **c)** cromo (Cr) obtenido mediante extracción secuencial de los sedimentos Troncos del Talar (TT), pre y post-tratamiento de los ensayos de biolixiviación bajo diferentes porcentajes

de pulpa. Los porcentajes de metales extraídos están normalizados por kg de sedimento en peso seco. Las nomenclaturas utilizadas para las fracciones de metales fueron: **F1**, **F2**, **F3** y **F4** refieren a las fracciones en donde se midieron los metales: 1 (intercambiable), 2 (reducible), 3 (oxidante) y 4 (residual) respectivamente. *Sed TT*. se refiere al sedimento de Troncos del Talar sin tratamiento, *s/inóc.* corresponde a los controles sin inocular, mientras que *Inóc.* hace referencia a los sistemas con inóculos de las comunidades Fe-Ox y S-Ox .

Conclusiones

Se comprobó la eficiencia en la biorremediación de los metales Zn, Cu y Cr presentes en los sedimentos contaminados de la zona de Troncos del Talar, mediante la utilización de biopelículas sobre azufre elemental de comunidades bacterianas hierro y azufre-oxidantes nativas del sedimento contaminado. El crecimiento de las bacterias fue óptimo durante los ensayos, siguiendo una tendencia similar a la reportada en bibliografía para los parámetros cinéticos de crecimiento de las comunidades bacterianas.

Se evidenció que la combinación de bioestimulación y bioaumento, mediante inoculación con biopelículas de azufre pre-colonizadas y cultivos de S-Ox y Fe-Ox, potencia significativamente la acidificación inicial y el consumo de Fe^{2+} , mostrando un

efecto sinérgico frente a la bioestimulación sola.

Se obtuvieron porcentajes de extracción de Zn comparables para ambos porcentajes de pulpa, mientras que para Cu y Cr la extracción fue notablemente mayor utilizando 5% de pulpa. Estos resultados sugieren que un menor porcentaje de pulpa favorece la efectividad de la biolixiviación. No obstante, en el caso del Zn, resulta más conveniente trabajar con 10% de pulpa, ya que se alcanza un nivel de extracción similar al obtenido con 5%, pero con la ventaja de reducir el consumo de reactivos debido al mayor cociente sedimento/volumen de solución lixivante, lo que contribuye a un proceso más sustentable. En términos generales, la lixiviación de los metales hacia la solución así como la movilización de los metales desde fracciones del sedimento más resistente hacia las más lábiles, fue más significativa en el ensayo con menor densidad de pulpa. Comprender la movilidad de los metales en las distintas fracciones de la matriz sedimentaria es fundamental para diseñar estrategias que optimicen su recuperación, ya que la matriz a la que están asociados juega un papel clave en los procesos de biolixiviación, al constituir el principal punto de acción de los microorganismos.

Los resultados mostraron que la efectividad de la biolixiviación mediante inoculación con biopelículas de azufre pre-

colonizadas fue menor a la esperada, posiblemente debido a un efecto de pasivación provocado por el medio 2K, que contiene hierro. Por ello, se planifica realizar futuros ensayos para formar *biofilms* de ambas comunidades acidófilas sobre azufre utilizando inicialmente un medio 0K, libre de hierro, con el fin de evaluar si la colonización se mantiene y si esto incrementa la eficiencia de la biolixiviación en comparación con los controles sin inocular.

El estudio realizado aquí permite avanzar en la comprensión de las interacciones entre las comunidades bacterianas acidófilas, los sedimentos y los metales pesados Zn, Cu y Cr. Con miras al futuro, se buscarán alternativas más sustentables para disminuir el consumo de reactivos, tales como la evaluación de diferentes geometrías de reactor, la variación de la concentración de inóculos iniciales, la recuperación de metales lixiviados, entre otras estrategias. Asimismo, el pre-colonizado de los sustratos previo al inicio de los ensayos favoreció el desarrollo de biopelículas, las cuales resultaron determinantes en la eficiencia de la extracción de metales. Optimizar el uso de estas biopelículas, en conjunto con otras variables, constituye un camino prometedor para mejorar los procesos de biorremediación de metales pesados en sedimentos de manera más sustentable.

Referencia bibliográfica

- Chen, Y., Lin, M., & Zhuang, D. (2022). Wastewater treatment and emerging contaminants: Bibliometric analysis. *Chemosphere*, 297, 133932.
- Di Nanno, M. P. (2007). *Acidificación por oxidación del azufre: aspectos microbiológicos y geoquímicos del ciclo en rocas y sedimentos* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de San Martín.
- Fomina, M., & Skorochod, I. (2020). Microbial interaction with clay minerals and its environmental and biotechnological implications. *Minerals*, 10(10), 861.
- González-Fernández, D., arrido-Pérez, M. C., Nebot-Sanz, E., & Sales-Márquez, D. (2011). Source and fate of heavy metals in marine sediments from a semi-enclosed deep embayment subjected to severe anthropogenic activities. *Water, Air, & Soil Pollution*, 221(1–4), 191–202.
- Grimolizzi, C. (2019). *Aislamiento y caracterización de bacterias autóctonas, con potencial en biolixiviación de sedimentos del Río Reconquista* (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional de San Martín.
- Johnson, D. B., & Hallberg, K. B. (2005). Acid mine drainage remediation options: A review. *Science of The Total Environment*, 338(1–2), 3–14.
- Jones, S., & Santini, J. M. (2023). Mechanisms of bioleaching: Iron and sulfur oxidation by acidophilic microorganisms. *Essays in Biochemistry*, 67(4), 685–699.
- Mondino, E. (2007). *Informe especial cuenca del río Reconquista*. Defensor del Pueblo de la Nación Argentina.
- Park, Y., & Faivre, D. (2022). Diversity of microbial metal sulfide biomineralization. *ChemPlusChem*, 87(3), e202100457.
- Pescuma, A., & Guaresmi, M. (1992). *Proyecto de saneamiento ambiental y control de inundaciones de la cuenca del Río Reconquista. Informe final*. Buenos Aires.
- Porzionato, N. F. (2016). *Evaluación del potencial de acidificación, liberación de metales y posibilidades de remediación de sedimentos del río Reconquista* (Tesis doctoral, Universidad Nacional de San Martín, Argentina). Universidad Nacional de San Martín.
- Pradhan, D. (2021). Bioleaching of Cu and Zn from complex sulfide using an isolated iron oxidizing bacteria. *Life: International Journal of Health and Life Sciences*, 10(1), 1825–1832. <https://doi.org/10.33263/LIANBS10.1.1825.1832>

- Rouchalova, D., Rouchalova, K., Janakova, I., Cablik, V., & Janstova, S. (2020). Bioleaching of iron, copper, lead, and zinc from the sludge mining sediment at different particle sizes, pH, and pulp density using *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Minerals*, 10(11), 1013. <https://doi.org/10.3390/min10111013>
- Su, Z., Li, X., Xi, Y., Xie, T., Liu, Y., Liu, B., Liu, H., Xu, W., & Zhang, C. (2022). Microbe-mediated transformation of metal sulfides: Mechanisms and environmental significance. *Science of The Total Environment*, 825, 153767.
- Tufo, A. E., Vázquez, S., Porzionato, N. F., Grimolizzi, M. C., Prados, M. B., Sica, M., & Curutchet, G. (2021). Contamination alters the physicochemical and textural characteristics of clays in the sediments of the peri-urban Reconquista River, affecting the associated indigenous microorganisms. *Minerals*, 11(3), 242.
- Ure, A. M., Quevauviller, P. H., Muntau, H., & Griepink, B. (1993). Speciation of heavy metals in soils and sediments: An account of the improvement and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BCR of the Commission of the European Communities. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 51(1–4), 135–151. <https://doi.org/10.1080/03067319308027619>
- Vera, M., Schippers, A., & Sand, W. (2013). Progress in bioleaching: Fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation—Part A. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(17), 7529–7541.
- Wu, C., Hu, X., Wang, H., Lin, Q., Shen, C., & Lou, L. (2023). Exploring key physicochemical sediment properties influencing bioleaching of heavy metals. *Journal of Hazardous Materials*, 445, 130506.
- Zhang, C., Yu, Z.-g., Zeng, G.-m., Jiang, M., Yang, Z.-z., Cui, F., Zhu, M.-y., Shen, L.-q., & Hu, L. (2014). Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability. *Environment International*, 73, 270–281.
- Zhang, C., Zhu, M.-y., Zeng, G.-m., Yu, Z.-g., Cui, F., Yang, Z.-z., & Shen, L.-q. (2016). Active capping technology: A new environmental remediation of contaminated sediment. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(5), 4370–4386.

27.- Ciencia, tecnología e innovación

Optimización del diseño estructural y programación de ensamble de torre de enfriamiento.

Autor: Chaperón Ornella, ochaperon@comunidad.unnoba.edu.ar

Co-autor(es): Cichero Renso, rensocichero@unnoba.edu.ar; Giordano Walter,
wgiordano@comunidad.unnoba.edu.ar

Orientador/a: Cichero Renso, rensocichero@unnoba.edu.ar

Laboratorio de Desarrollo de Ingeniería Mecánica e Industrial (LaDIMI) – Universidad
Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires – Argentina

Resumen: El proyecto de promoción de la investigación científica N.º 5619/2024 plantea la puesta a punto de una torre de enfriamiento, con fines didácticos y de investigación en el Laboratorio de Desarrollo de Ingeniería Mecánica e Industrial. Con el propósito de optimizar su funcionamiento, facilitar el mantenimiento y mejorar la operatividad del sistema, se modificó el diseño estructural original.

La nueva configuración incorpora un diseño modular que elimina la necesidad de soldaduras entre subconjuntos, permitiendo una rápida intervención sobre el sistema mediante el uso exclusivo de herramientas simples, sin requerir equipamiento eléctrico ni especializado. Esta modificación facilitará el reemplazo del material de relleno y la adaptación de las condiciones de operación, para los diferentes usos previstos del equipo.

Dado que la torre será utilizada tanto en actividades de investigación como en demostraciones académicas, esta mejora adquiere especial relevancia. En el ámbito de la investigación, los parámetros operativos y el estado del material de relleno requieren un control riguroso, y personal capacitado, mientras que en el contexto didáctico, donde se prioriza el aprendizaje experiencial y demostrativo, la torre puede ser operada por estudiantes exigiendo mayor versatilidad en el uso del equipo, incluso con menor rigurosidad en las condiciones de operación y cuidado del relleno.

La metodología incluyó el rediseño estructural, la planificación y programación de actividades, y el desmontaje de la torre para la ejecución de las modificaciones en sus componentes, seguido de su reensamblado. Cabe destacar que se reutiliza el 100 % de las partes originales, previa adaptación de las mismas según los requerimientos del nuevo diseño.

Palabras clave: Reingeniería aplicada, Infraestructura didáctica experimental, Torre Enfriamiento.

Introducción

La enseñanza de la ingeniería requiere para su correcta comprensión vincular conceptos teóricos con experiencias prácticas. En este sentido, contar con equipos experimentales en los laboratorios constituye un recurso didáctico fundamental. Las torres de enfriamiento son dispositivos ampliamente utilizados en la industria para el intercambio de calor entre agua y aire, pero su incorporación a la enseñanza universitaria suele ser limitada por los costos y dimensiones de los equipos comerciales.

En el año 2022 se presentó un proyecto en busca de financiamiento titulado “Diseño, desarrollo y construcción de prototipo de torre de enfriamiento para intercambiador de calor didáctico” (convocatoria SIB-UNNOBA 2022). El proyecto fué aprobado por la Secretaría de Investigación, Desarrollo y Transferencia (SIDT) de la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (UNNOBA) y eso permitió que durante los años 2023 y 2024 se construyera y probará el funcionamiento básico de una torre de enfriamiento con una doble finalidad: investigación y formación práctica de estudiantes de ingeniería en las diferentes asignaturas afines a la termodinámica, transferencia de calor y mecánica de fluidos..

La experiencia práctica en un laboratorio resulta un aspecto de gran relevancia didáctica en el proceso de aprendizaje de cualquier estudiante. Para que las y los estudiantes puedan comprender, estudiar y analizar las variables termodinámicas que entran en juego en el proceso de enfriamiento del agua proveniente de un proceso industrial, se consolidó un equipo multidisciplinario para diseñar, desarrollar y materializar el prototipo de una torre de enfriamiento para baja capacidad y potencia.

Una vez construido el prototipo, las y los estudiantes podrán comparar y analizar errores e incertidumbres de los procedimientos de cálculo basados en modelos matemáticos tradicionales, simulaciones virtuales, y experiencias prácticas de laboratorio.

Desde el punto de vista técnico, una torre de enfriamiento es un dispositivo utilizado en diferentes procesos de operaciones unitarias para disipar el exceso de calor generado por sistemas industriales o de refrigeración. Su función principal es eliminar el calor residual absorbido por un fluido (generalmente agua) que ha sido utilizado para enfriar algún proceso o equipo.

El proceso de enfriamiento en una torre de refrigeración funciona mediante la evaporación del agua en un proceso de

transferencia de masa y energía entre dos fluidos a diferentes temperaturas en contacto (Generalmente agua y aire).

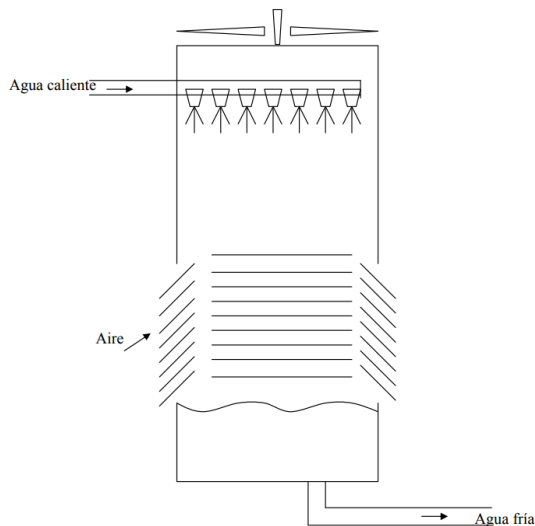


Figura 1: Diagrama de torre de enfriamiento.

El correcto diseño de una torre de enfriamiento combina una gran superficie de agua expuesta, en contacto con un flujo másico de aire relativamente alto durante el mayor tiempo posible.

En una torre de enfriamiento, las variables atmosféricas impactan directamente en la eficiencia del equipo. A diferencia de una torre de enfriamiento comercial, este proyecto plantea el diseño y desarrollo a medida para la localidad de Junín.

Objetivos.

El proyecto plantea un objetivo general y seis objetivos específicos:

→ Objetivo General

- Planificar, programar y controlar actividades para la materialización

del nuevo diseño de la torre de enfriamiento

→ Objetivos Específicos

- Programar las actividades para dismantelar la torre existente.
- Programar las actividades para materializar el nuevo diseño estructural de la torre de enfriamiento.
- Controlar las actividades programadas y el diseño estructural.
- Programar las actividades para materializar el nuevo diseño del sistema de fluidos de la torre.
- Controlar las actividades programadas y el diseño del sistema de fluidos.
- Elaboración de un procedimiento de uso con fines de práctica educativa experimental.
- Elaboración de un plan de mantenimiento del equipo.

Materiales y métodos

Metodología

La puesta a punto de la torre de enfriamiento seguirá una metodología estructurada en cuatro etapas principales: diagnóstico de estado actual, intervención técnica, desarrollo didáctico y validación. Cada etapa contempla actividades específicas para garantizar que el equipo cumpla con los requisitos funcionales y pedagógicos necesarios para su

integración en el laboratorio. El método de diseño fué expuesto en la 30 Jornada de Jóvenes Investigadores AUGM realizada en el año 2023 en Asunción, Paraguay.

Materiales

La torre de enfriamiento se compone de tres subconjuntos principales: sistema estructural, sistema hidráulico y sistema eléctrico.

En el sistema estructural se incluyen la bacha o depósito inferior donde se acumula el agua enfriada, la estructura metálica de soporte que brinda rigidez y estabilidad al conjunto, el cuerpo de la torre que contiene los componentes internos (relleno), el soporte de relleno brinda sustento al material particulado que se coloca en el interior, la campana ubicada en la parte superior canaliza el aire de salida y brinda anclaje a un ventilador, y un cuadro con ruedas que facilita el desplazamiento del equipo dentro del laboratorio. Todo construido con acero de bajo carbono protegido con pintura epoxi resistente a la corrosión.

El sistema hidráulico se encuentra compuesto por un tramo de cañerías rígidas que conectan los diferentes accesorios y elementos, un tramo de cañería flexible que permite vincular la torre con otros equipos del laboratorio que requieren enfriamiento, las válvulas esféricas necesarias utilizadas para

regular el caudal de agua de enfriamiento, la bomba hidráulica de tipo periférica que impulsa el agua desde la bacha hacia el sistema que requiere enfriamiento regresando al extremo superior de la torre, donde se encuentra el difusor o rociador que distribuye el agua en forma de lluvia sobre el relleno. Un separador de gotas colocado entre el rociador y el ventilador evita el arrastre de agua junto con el aire. Tanto el relleno como el separador de gotas son de polímeros como P.A.I., P.V.C. y A.B.S., adecuados para maximizar la superficie de contacto entre agua y aire y mejorar la eficiencia en la transferencia de calor.

El sistema eléctrico se compone a su vez por dos subsistemas. En un tablero eléctrico dotado con elementos de potencia (contactores, llaves termomagnéticas y disyuntores), elementos de control (llaves selectoras y pulsadores) y elementos de visualización (Luz testigo de zona energizada), se derivan un tramo trifásico, utilizado para comandar el ventilador de aire (extractor axial de 25 cm) ubicado en la campana superior, y un tramo monofásico para accionar la bomba periférica que impulsa el agua de refrigeración.

Luego se incorporará el instrumental necesario para la adquisición de datos y monitoreo de variables de procesos.

Resultados y discusión

En el Laboratorio de Desarrollo de Ingeniería Mecánica e Industrial (LaDIMI) se desarrolló un equipo intercambiador de calor de tubos concéntricos para simular un proceso industrial que requiere enfriamiento. El agua de proceso y el agua de refrigeración no están en contacto y ambos son circuitos cerrados con un mínimo de agua de reposición dada por las pérdidas fundamentalmente en el mecanismo de evaporación.

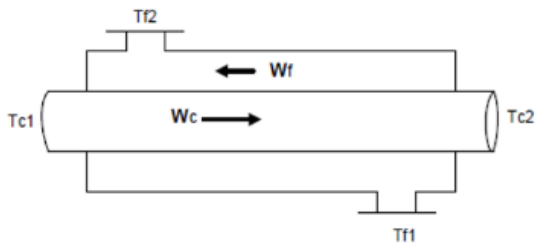


Figura 2: Diagrama de intercambiador de calor de tubos concéntricos.

Se espera que el consumo de agua en el proceso y como resultado de la evaporación sea de entre 1% y 3% para reducir la temperatura 12 °C con una altura de relleno de 30cm. En las pruebas realizadas con agua ingresando a la torre a 31°C se logró un salto térmico de 5°C con condiciones ambientales favorables (26°C y 48% de humedad).

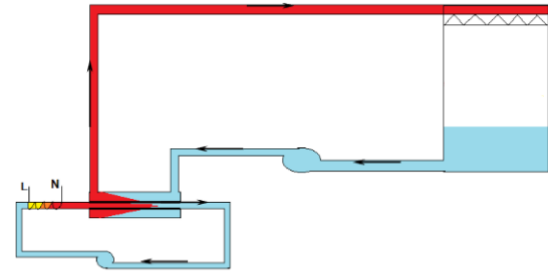


Figura 3: Dibujo de vinculación entre torre de enfriamiento e intercambiador de calor de tubos concéntricos.

Durante las pruebas realizadas se detectó la necesidad de modificar el diseño para mejorar aspectos técnicos de funcionalidad de una torre de enfriamiento y aspectos técnicos desde el punto de vista de la adaptación de la torre para diversos usos (investigación y prácticas académicas).

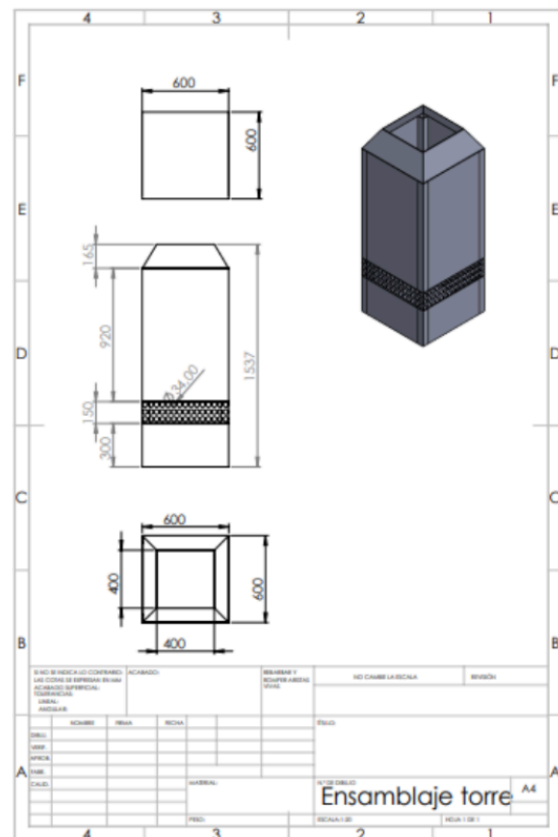


Figura 4: Dibujo de la torre de enfriamiento



Figura 5: Bacha de la torre



Figura 8: Campana de extracción.

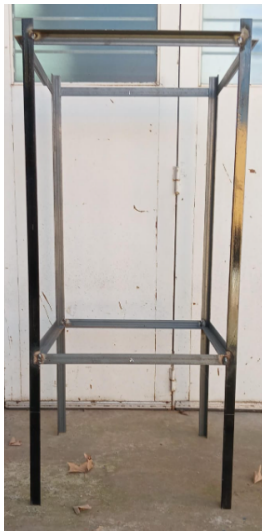


Figura 6: Estructura de la torre



Figura 9: Sistema de extracción.



Figura 7: Cuerpo de la torre



Figura 10: Torre de enfriamiento

El nuevo diseño supone un ensamble modular y flexible, de fácil mantenimiento, con la posibilidad de incorporar instrumental de adquisición de datos y

modificaciones rápidas en el tipo y disposición de relleno.

Esta nueva configuración incorpora un diseño modular que elimina la necesidad de soldaduras entre subconjuntos, permitiendo así una rápida intervención sobre el sistema mediante el uso exclusivo de herramientas manuales simples, sin requerir equipamiento eléctrico ni especializado. Esta modificación facilitará el reemplazo del material de relleno y la adaptación de las condiciones de operación, aspectos clave para los usos previstos del equipo.

Dado que la torre será utilizada tanto en actividades de investigación como en demostraciones académicas, esta mejora adquiere especial relevancia. En el ámbito de la investigación, los parámetros operativos y el estado del material de relleno requieren un control riguroso, realizado por personal capacitado y con materiales de alto costo económico. En cambio, en el contexto didáctico, donde se prioriza el aprendizaje experiencial y demostrativo, la torre puede ser operada por estudiantes y sometida a pruebas que exigen mayor versatilidad en el uso del equipo, incluso con menor rigurosidad en las condiciones de operación, calidad y cuidado del relleno.

Se incorpora también un sistema de ruedas con freno para facilitar el traslado y

almacenamiento de la torre mientras no esté en uso.

Conclusiones

La puesta a punto de la torre de enfriamiento en el LaDIMI representó una experiencia de reingeniería aplicada, en la que se optimizó un diseño previo para adecuarlo tanto a fines de investigación como de docencia. La incorporación de un sistema modular sin soldaduras permanentes permitió facilitar el mantenimiento, mejorar la operatividad y garantizar la adaptabilidad del equipo frente a diferentes condiciones de uso.

El diseño final integra de manera equilibrada los aspectos estructurales, hidráulicos y eléctricos, posibilitando un funcionamiento confiable que reproduce de forma controlada los principios de transferencia de calor y masa propios de la industria. De este modo, la torre no solo constituye una herramienta de investigación, al permitir el análisis riguroso de variables de operación y rendimiento, sino también un recurso didáctico de alto valor, que vincula el aprendizaje teórico con la práctica experimental.

En definitiva, el proyecto materializó un equipo versátil, accesible y funcional, capaz de potenciar tanto la formación académica de estudiantes de ingeniería como el desarrollo de nuevas líneas de

investigación aplicada en el ámbito de la termodinámica y la mecánica de fluidos.

Bibliografía

Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons.

Perry, Robert H. y D.G. (1992) *Manual del Ingeniero Químico*, sexta edición; Mc Graw-Hill; México.

Cichero, R., & Giordano, W. (2023). *Diseño de torre de enfriamiento con fines académicos y para la investigación*. En la 30 Jornada de Jóvenes Investigadores de la Asociación de Universidades Grupo Montevideo (AUGM), Universidad Nacional de Asunción, Paraguay.

Financiamiento

La UNNOBA a través de la Secretaría de Investigación, Desarrollo y Transferencia otorgó subsidio al proyecto en el año 2022 para el diseño, desarrollo y construcción del prototipo de torre de enfriamiento. Las modificaciones realizadas con posterioridad se realizaron reutilizando mediante adaptaciones e intervenciones el 100% de los componentes y el aporte del laboratorio con los insumos consumibles y el recurso humano.

Agradecimiento

Los autores agradecemos a la Universidad

Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (UNNOBA) por proveer los recursos necesarios para la realización de este trabajo y la posibilidad de exponerlo en esta jornada.

30. Productos naturales bioactivos y sus aplicaciones

Mas allá de lo convencional: Proteínas de camarones de la cuenca del Paraná y su potencial en la prevención de la obesidad y dislipidemia

Autor: Stechina, Sara; E. mail: sarastechina@gmail.com

Co-autor(es): Collins, Pablo; E. mail: pagcollins@gmail.com, Vargas, Matías, E.mail:
mrvargas@fbc.unl.edu.ar,

Orientador/a: Ferreira, María del Rosario; E. mail: mrferreira@fbc.unl.edu.ar, D'Alessandro,
María Eugenia; E. mail: medaless@fbc.unl.edu.ar

Universidad Nacional del Litoral - Facultad de Bioquímica y Ciencias Biológicas - Laboratorio
de Estudio de Enfermedades Metabólicas Relacionadas con la Nutrición

Santa Fe - Argentina

Resumen

El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de un extracto proteico -rico en aminoácidos funcionales- obtenido de Crustáceos Decápodos de la cuenca del Paraná (camarón *Macrobrachium borellii*) sobre el sobrepeso/adiposidad, estrés oxidativo del tejido adiposo epididimal (TAE) y dislipidemia presentes en ratas alimentadas con una dieta rica en sacarosa (DRS). Ratas macho Wistar se dividieron en 3 grupos: 1-Grupo de Referencia (DR) recibió una dieta estándar comercial de laboratorio para roedores, 2-Grupo DRS recibió una DRS conteniendo caseína como fuente de proteína y 3-Grupo DRS+Proteína de crustáceos (DRS+PCr) recibió una DRS en la que el 50% de la fuente proteica se reemplazó por un extracto proteico obtenido de *M. borellii*. La composición de aminoácidos de las dietas se determinó por HPLC. Se analizó: a- ganancia de peso, ingesta energética y parámetros biométricos, b- pesos de tejidos adiposos e índice de adiposidad visceral (IAV), c- en TAE: morfología de adipocitos aislados, niveles de especies reactivas del oxígeno (ERO) y sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS), actividad de enzimas antioxidantes catalasa, glutatión peroxidasa y glutatión reductasa, d- niveles de lípidos séricos. Los datos se analizaron por One-way ANOVA y post test de Newman-Keuls. Comparado con el grupo DRS, el grupo DRS+PCr presentó: menor ganancia de peso y pesos de tejidos adiposos mesentérico y retroperitoneal. En TAE: menor tamaño de adipocitos, niveles de ERO y TBARS y mayor actividad de enzimas antioxidantes. En suero: menores niveles de colesterol y ácidos grasos libres. La ingesta energética, circunferencia abdominal, IAV y niveles de triglicéridos

en suero fueron similares en los grupos DRS y DRS+PCr y superiores a los del grupo DR.

Palabras claves: adiposidad, dislipidemia, proteína de camarones

Introducción

La obesidad es una enfermedad crónica compleja que se define por una acumulación anormal o excesiva de grasa (OMS, 2024). Actualmente, es considerada una epidemia a nivel mundial afectando a millones de individuos, no sólo adultos, sino también niños y adolescentes (OMS, 2024).

En la obesidad el tejido adiposo (TA), principalmente visceral, experimenta cambios morfológicos y funcionales que interfieren no sólo con su normal funcionamiento sino que además, promueven el desarrollo de diferentes desórdenes metabólicos, entre los que se incluye la dislipidemia (Chait y Hartigh, 2020; Klop, Elte, y Cabezas, 2013).

Diferentes estudios a nivel experimental, incluyendo nuestro grupo, han demostrado que el estrés oxidativo se encuentra entre los mecanismos que juegan un rol protagónico tanto en la disfunción del TA como en las comorbilidades asociadas a la obesidad (D'Alessandro, Selenscig, Illesca, Chicco y Lombardo, 2015; Ferreira, Alvarez, Illesca, Giménez y Lombardo, 2016; Manna y Jain, 2015). El estrés oxidativo celular es causado por un desbalance entre la generación y detoxificación de moléculas parcialmente

reducidas derivadas del oxígeno conocidas en su conjunto como especies reactivas del oxígeno (ERO). Las ERO tienen un rol dual ya que, a niveles fisiológicos actúan como importantes moléculas de señal en los diferentes tejidos, sin embargo, una excesiva producción de estas moléculas conduce a modificación oxidativa de proteínas, lípidos y ácidos nucleicos impactando esto sobre el normal funcionamiento de las células. En los sistemas biológicos existen diversos sistemas de defensas antioxidantes (enzimáticos y no enzimáticos) encargados de contrarrestar los efectos nocivos de las ERO. Dentro de los sistemas de defensa enzimáticos juegan un rol clave, entre otras, las enzimas catalasa, glutatión peroxidasa y glutatión reductasa (Gil Hernández, 2010).

La obesidad, la dislipidemia y otras alteraciones metabólicas asociadas aumentan el riesgo de enfermedad cardiovascular y diabetes, cuyos patrones de prevalencia se ven fuertemente influenciados por la elevada incidencia de esos desórdenes. Si bien se han identificados factores genéticos que explican la mayor susceptibilidad de algunos individuos a la obesidad, los cambios sucedidos en el régimen

alimentario de las sociedades modernas, caracterizado por el consumo de dietas hipercalóricas, con alto contenido de grasas saturadas, azúcares simples y pobres en proteínas, representan uno de los factores claves que han repercutido dramáticamente en los elevados patrones de prevalencia de sobrepeso/obesidad y de sus comorbilidades (Juneja et al., 2019). Por este motivo, la promoción de estilos de vida saludables entre los que se incluye la incorporación de alimentos con potenciales beneficios en el manejo del peso corporal, prevención de la adiposidad visceral y de sus desórdenes asociados resulta un tema prioritario.

Un grupo biológico de interés son los Crustáceos Decápodos de la cuenca del Paraná (camarón: *Macrobrachium borellii*). Estos no son consumidos tradicionalmente en Argentina. Sin embargo, presentan potenciales beneficios para la salud del hombre debido a que poseen, entre otras biomoléculas, un alto contenido de proteínas fuente de aminoácidos (AAs) funcionales (Carvalho et al., 2020). Los AAs funcionales se definen como aquellos AAs que regulan vías metabólicas claves para mejorar la salud, la supervivencia, el crecimiento, desarrollo, lactancia y reproducción de los organismos (Wu, 2013).

Esta característica convierte a los camarones de la cuenca del Paraná en una potencial nueva fuente proteica

prometedora en la prevención y tratamiento de diferentes enfermedades.

Al presente no existe evidencia acerca de los efectos de concentrados proteicos obtenidos de esta fuente no convencional sobre el sobrepeso/adiposidad y dislipidemia.

Objetivos

Evaluar el efecto de la administración de un extracto proteico obtenido de Crustáceos Decápodos de la cuenca del Paraná (camarón: *Macrobrachium borellii*) sobre parámetros biométricos, aspectos morfológicos y estado oxidativo del tejido adiposo visceral y dislipidemia en un modelo experimental de adiposidad visceral y desórdenes metabólicos asociados inducido por administración crónica de una dieta rica en sacarosa.

Materiales y Métodos

Se utilizaron ratas macho de la cepa Wistar (n=18) provenientes del Centro de Medicina Comparada (ICIVET, UNL-CONICET, Esperanza, Santa Fe, Argentina) con un peso inicial de 180-200 g (~ 8 semanas de edad, adultos jóvenes). Los animales fueron mantenidos en el bioterio del Departamento de Ciencias Biológicas de la Facultad de Bioquímica y Ciencias Biológicas (Universidad Nacional del Litoral) bajo condiciones controladas de humedad (55 ± 5 %) y temperatura (22 ± 1 °C), con ciclos luz-oscuridad de 12 horas

(7:00 - 19:00 hs), libre acceso al agua y a una dieta estándar comercial (GEPSE FEED, Buenos Aires, Argentina) y cumpliendo con las guías internacionales del cuidado y buen uso de animales de laboratorio. El protocolo experimental fue evaluado y aprobado por el Comité de Ética y Seguridad de la Investigación de la Facultad de Bioquímica y Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional del Litoral (Santa Fe, Argentina, CE2020-75). Luego de una semana desde su arribo al laboratorio (período de aclimatación), los animales fueron divididos en tres grupos: a-Grupo de referencia (DR) (n=6), continuó recibiendo la dieta estándar comercial de laboratorio para roedores, energía: 11.3 kJ/g. b- Grupo dieta rica en sacarosa (DRS) (n=6), recibió una dieta conteniendo (g/kg dieta): hidratos de carbono 714 (sacarosa 630, almidón 63, dextrina 21); proteína (caseína libre de vitaminas-85% proteína-) 140 y grasa 60, energía: 16.2 kJ/g. c- Grupo DRS + proteína de crustáceos (DRS+PCr) (n=6): recibió una DRS en la que el 50% de la fuente de proteína (caseína) se reemplazó por un extracto proteico obtenido de Crustáceos Decápodos- camarón *Macrobrachium borellii*-, energía: 16.2 kJ/g. Las dietas DRS y DRS+PCr fueron diseñadas de acuerdo con las recomendaciones del Informe Americano de Nutrición, Comité ad hoc (AIN-93), para estudios de Nutrición en animales (Reeves, Nielsen y Fahey, 1993)

y administradas *ad libitum* durante 90 días. La TABLA 1 muestra la composición de aminoácidos de las dietas DRS y DRS+PCr determinada por HPLC.

TABLA 1. Composición de aminoácidos (g/kg de dieta) de las dietas DRS y DRS+PCr.

	DRS	DRS+PCr
Leucina	10,4	10,8
Isoleucina	5,6	5,9
Valina	7,0	6,3
Metionina	6,2	9,1
Fenilalanina	6,0	6,1
Lisina	8,8	10,3
Treonina	4,4	5,1
Histidina	3,2	2,9
Arginina	4,2	7,9
Cisteína	0,6	0,6
Tirosina	6,6	5,4
Serina	6,4	6,2
Prolina	13,6	7,8
Glicina	2,2	5,3
Ac. glutámico	24,4	24,7
Ac. Aspártico	7,6	13
Triptofano	1,6	0,8
Alanina	3,2	3,3

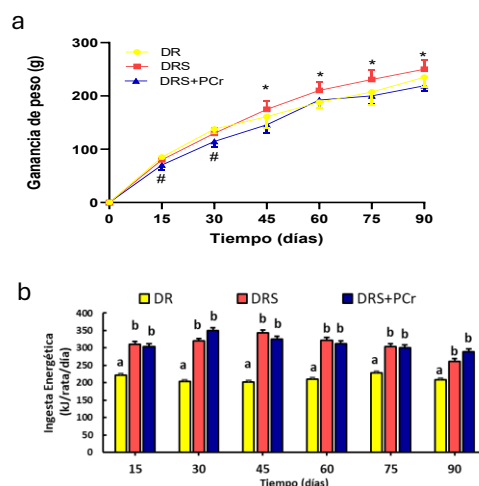
Durante el período experimental se registró diariamente el peso corporal y la ingesta energética. Al finalizar el mismo, los animales fueron anestesiados por inyección intraperitoneal de pentobarbital sódico (60 mg/kg peso corporal). Se determinaron parámetros biométricos según se describió previamente (Oliva, Ferreira, Vega Joubert y D'Alessandro, 2021). Luego se realizó la eutanasia por decapitación y la sangre troncal fue

recolectada y centrifugada para la obtención de suero. Se determinaron los niveles séricos de triglicéridos (TG), colesterol total (CT) y ácidos grasos libres (AGL) utilizando kits comerciales (Wiener Lab, Argentina; Randox Laboratories, Reino Unido). El tejido adiposo epididimal (TAE) fue extraído y pesado. Una alícuota fue congelada y conservada a -80°C hasta su procesamiento. Otra porción fue utilizada inmediatamente para el aislamiento de los adipocitos y determinación de características morfológicas según se describió previamente (Aiassa, Ferreira, Villafañe y D'Alessandro, 2022). Los tejidos adiposos retroperitoneal (TAR) y mesentérico (TAM) también fueron extraídos y pesados para el cálculo del índice de adiposidad visceral (IAV) (Rossi, Oliva, Ferreira, Chicco y Lombardo, 2013). En TAE se determinaron parámetros asociados al estado oxidativo del tejido: a- niveles de ERO y Sustancias Reactivas al Ácido Tiobarbitúrico (TBARS), b-actividad de enzimas catalasa (CAT), glutatión peroxidasa (GPX) y glutatión reductasa (GR) según metodología previamente descrita (D'Alessandro et al., 2015; Ferreira et al., 2018). Los resultados se expresan como media \pm SEM. La significancia estadística entre los grupos se determinó por la prueba One-way ANOVA y post test de Newman Keuls. Valores de $P < 0,05$ se consideraron estadísticamente significativos.

Resultados y Discusión

Ganancia de peso, ingesta energética y parámetros biométricos.

FIGURA 1: Ganancia de peso (a) e Ingesta energética (b).



Los valores se expresan como Media \pm SEM (n=6). (a) # $P < 0,05$ DRS+PCr vs DR y DRS; * $P < 0,05$ DRS vs DR y DRS+PCr. (b) Valores que no presentan la misma letra son significativamente diferentes. $P < 0,05$.

Los animales alimentados con DRS presentaron una mayor ($P < 0,05$) ganancia de peso (FIGURA 1a) desde el día 45 de ingesta y mayor ingesta energética durante todo el período experimental (FIGURA 1b) cuando se los comparó con los del grupo DR. Los animales del grupo DRS+PCr presentaron una menor ($P < 0,05$) ganancia de peso durante todo el período experimental cuando se los comparó con el grupo DRS, aunque no se observaron diferencias estadísticamente significativas en la ingesta energética entre el grupo DRS y DRS+PCr (FIGURAS 1a y 1b).

La TABLA 2 muestra que los animales alimentados con DRS y DRS+PCr presentaron una mayor ($P < 0,05$) circunferencia abdominal al compararlos

con los del grupo DR. No se observaron diferencias estadísticamente significativas en ninguno de los otros parámetros e índices biométricos evaluados entre los 3 grupos dietarios.

TABLA 2. Parámetros e índices biométricos.

Parámetros biométricos	DR	DRS	DRS+PCr
L N-A (cm)	23.95± 0.20	24.00±0.10	23.82±0.10
CT (cm)	15.97±0.13	15.97±0.11	15.93±0.48
CA(cm)	17.89±0.31 (a)	19.11±0.17 (b)	19.52±0.33 (b)
IMC(g/cm ²)	0.756±0.007	0.783±0.011	0.759±0.013
Índice de Lee (g/cm)	0.312±0.001	0.319±0.002	0.317±0.002

Los valores se expresan como Media ± SEM (n=6). Los valores que no presentan la misma letra son significativamente diferentes P<0,05. CA: circunferencia abdominal; CT: circunferencia torácica; L N-A: longitud naso-anal; IMC: índice de masa corporal.

Adiposidad visceral y características morfológicas del TAE

La TABLA 3 muestra que la intervención con PCr fue capaz de prevenir/atenuar (P<0,05) el incremento de peso de los tejidos adiposos TAM y TAR inducido por la DRS. El peso del TAE y el IAV del grupo DRS+PCr fueron similares a los del grupo DRS. Sin embargo, la intervención con PCr fue capaz de atenuar la hipertrofia de los adipocitos e incremento intracelular de TG en el TAE, observados en los animales que recibieron DRS.

TABLA 3. Adiposidad visceral y características morfológicas del TAE.

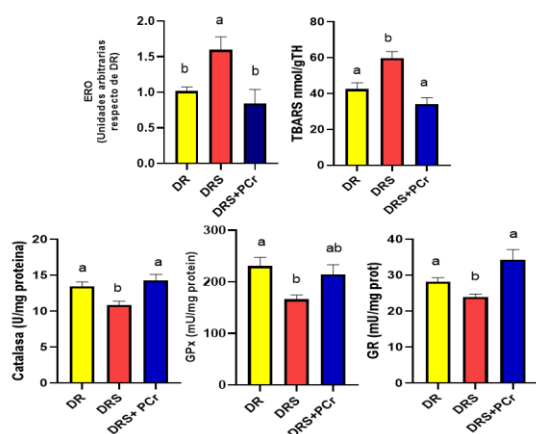
Adiposidad visceral	DR	DRS	DRS+PCr
Peso TAE (g)	11.94±0.19 (a)	15.63±0.40 (b)	14.90±0.51 (b)
Peso TAM (g)	6.00±0.25 (a)	8.07±0.27 (b)	6.85±0.22 (a)
Peso TAR (g)	10.38±0.66 (a)	13.05±0.49 (b)	11.65±0.86 (ab)
IAV (%)	6.62±0.20 (a)	7.88±0.18 (b)	7.80±0.20 (b)
Características morfológicas del TAE			
Diámetro celular medio (µm)	100.4±0.9 (a)	120.0±1.8 (b)	109.0±1.7 (c)
Volumen celular medio (pL)	570.2±15.2 (a)	967.5±44.6 (b)	713.8±31.9 (c)
Concentración de TG celular media (nmol/célula)	0.59±0.02 (a)	1.00±0.04 (b)	0.74±0.02 (c)
N° células x 10 ⁶ /g tejido	1.64±0.05 (a)	0.98±0.04 (b)	1.29±0.02 (c)

Los valores se expresan como Media ± SEM (n=6). Los valores que no presentan la misma letra son significativamente diferentes P<0,05. TAE: tejido adiposo epididimal; TAM: tejido adiposo mesentérico; TAR: tejido adiposo retroperitoneal; IAV: índice de adiposidad visceral.

Marcadores de estrés oxidativo en TAE

La FIGURA 2 muestra que la administración de PCr fue capaz de prevenir el incremento en los niveles de EROS y TBARS y prevenir/atenuar el deterioro del sistema enzimático antioxidante en el TAE observado tras la administración de una DRS.

FIGURA 2: Niveles de ERO, TBARS y actividad de enzimas antioxidantes en TAE.



Los valores se expresan como media \pm SEM (n=6). Los valores que no presentan la misma letra son significativamente diferentes $P < 0,05$.

Al presente, no existen trabajos que hayan evaluado el efecto de proteínas extraídas de *M. borellii* sobre la ganancia de peso y adiposidad visceral. Sin embargo, un estudio de Pílon et al., (2011) en el que se evaluó el efecto de hidrolizados proteicos provenientes de diferentes especies marinas de peces en ratas alimentadas con dietas mixtas (con alto contenido de grasa y sacarosa), mostró que hidrolizados de proteína de salmón fueron capaces de reducir la ganancia de peso y el peso del tejido adiposo epididimal, sin modificar los pesos de los tejidos adiposos subcutáneo y marrón. Al igual que en nuestro estudio, los autores reportaron que la ingesta energética fue similar en el grupo que recibió proteína de salmón al compararla con el grupo que recibió caseína como fuente de proteína. Dado que la ganancia de peso resulta del balance entra la ingesta y gasto energético, es posible que la menor

ganancia de peso pueda deberse a un aumento del gasto energético inducido por la PCr.

La menor ganancia de peso del grupo DRS+PCr fue acompañada por una disminución significativa del peso del TAM y una leve disminución del TAR. Posteriores estudios son necesarios para dilucidar si el menor peso corporal de los animales podría estar asociado a cambios en otros depósitos de grasa (subcutáneo, marrón).

A pesar de no haber observado diferencias entre el peso del TAE entre los grupos DRS y DRS+PCr, el tamaño y contenido de TG de los adipocitos del TAE fueron significativamente menores en los animales que consumieron DRS+PCr. Sumado a esto la intervención con PCr logró reducir los incrementados niveles de ERO y TBARS inducidos por la DRS y mejorar la deteriorada capacidad antioxidante del tejido. Resultados similares fueron reportados por Madani, Louchami, Sener, Malaisse y Ait Yahia, (2012), quienes demostraron en ratas alimentadas con una dieta rica en fructosa (64%) que la sustitución de la fuente proteica -caseína- por proteína de sardina fue capaz de mejorar las defensas enzimáticas antioxidantes y disminuir marcadores de estrés oxidativo en diferentes tejidos adiposos viscerales.

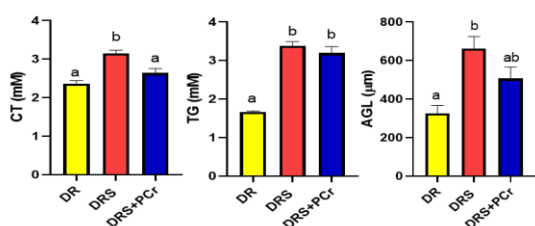
El efecto antioxidante de la PCr podría estar dado por sus aminoácidos

constituyentes. Al respecto se ha sugerido que aminoácidos como metionina, lisina y arginina (que se encuentran elevados en la DRS+PCr) tendrían una importante capacidad antioxidante (Xu, Chen y Liu, 2017). Además, se ha demostrado que aminoácidos como el aspartato tienen la capacidad de modular la vía de activación del factor de transcripción NRF2 (importante regulador de la respuesta al estrés oxidativo) (Egbujor et al., 2024). Los elevados niveles de aspartato presentes en la DRS+PCr podrían estar mediando también el efecto beneficioso de la PCr sobre el estrés oxidativo del TAE.

Perfil lipídico

La FIGURA 3 muestra que la intervención con PCr fue capaz de prevenir el desarrollo de hipercolesterolemia y atenuar el incremento de los niveles séricos de AGL inducidos por la DRS. No se observaron diferencias en los niveles de triglicéridos séricos entre los grupos DRS y DRS+PCr, los cuales fueron superiores a los hallados en el grupo DR.

FIGURA 3. Niveles séricos de colesterol total, triglicéridos y ácidos grasos libres.



Los valores se expresan como media \pm SEM (n=6). Los valores que no presentan la misma letra son significativamente diferentes $P < 0,05$. AGL: ácidos grasos libres; CT: colesterol total; TG: triglicéridos.

En concordancia con nuestros hallazgos, otros autores han reportado que proteínas de origen marino tendrían efecto hipocolesterolémico. Wergedahl et al., (2004) encontraron que ratas Zucker (*fa/fa*) genéticamente obesas que recibieron proteína de salmón (22-23 días) presentaron valores significativamente menores de colesterol en plasma que los animales que habían recibido caseína como fuente proteica. Los autores sugieren que uno de los mecanismos que podría explicar el efecto hipocolesterolémico observado estaría asociado al perfil de aminoácidos de la proteína de salmón. Existe evidencia que avala el efecto hipercolesterolémico de los aminoácidos metionina y lisina e hipocolesterolémico de los aminoácidos glicina y arginina (Sánchez, Rubano, Shavlik, Hubbard y Horning, 1988; Sugiyama y Muramatsu, 1990). En el estudio los autores reportan que la proteína de salmón tiene una relación metionina/glicina un 80-85% menor que la caseína, principalmente debido al alto contenido de glicina de la proteína de salmón. Además, la relación lisina/arginina es también menor en la proteína de origen marino cuando se la compara con la caseína. Esto último explicaría, al menos en parte, el efecto de esta intervención sobre los niveles de colesterol en plasma. En nuestro estudio la DRS+PCr presenta una menor relación metionina/glicina (1,73 DRS+PCr vs 2,83

DRS) y una menor relación lisina/arginina (1,31 DRS+PCr vs 2,09 DRS), por lo que al igual que en el estudio mencionado este podría ser un mecanismo asociado al efecto preventivo de la PCr sobre la hipercolesterolemia inducida por la DRS. El efecto hipocolesterolémico de proteínas de origen marino fue también reportado por Hosomi et al., (2011). Los autores demostraron que la administración de una dieta a ratas Wistar en la que se reemplazó el 50% de la fuente proteica (caseína) por proteína de pescado fue capaz de reducir los niveles de colesterol en suero. Esto estuvo acompañado de una mayor excreción fecal de colesterol y ácidos biliares, que estaría asociado al efecto hipocolesterolémico observado. Desconocemos al presente si la intervención con PCr podría tener efecto sobre este último aspecto, por lo que posteriores estudios acerca del efecto de la PCr sobre el metabolismo del colesterol serían de gran interés.

En relación con el efecto de proteínas de origen marino sobre la hipertrigliceridemia, algunos estudios -principalmente a nivel experimental- han reportado que las mismas tendrían efectos beneficiosos en su prevención mientras que otros no han encontrado efecto alguno sobre los niveles de triglicéridos circulantes (Wergedahl et al., 2004; Shuckla et al., 2006; Hosomi, Fukunaga, Arai, Nishiyama, y Yoshida, 2009). En nuestro estudio la intervención

con PCr no fue capaz de prevenir la hipertrigliceridemia inducida por la DRS. Sin embargo, observamos que el grupo DRS+PCr presentó una reducción en los niveles de AGL circulantes al compararlo con el grupo DRS. Previamente hemos demostrado que los adipocitos hipertrofiados del TAE de los animales alimentados crónicamente con DRS presentan diferentes desórdenes del metabolismo lipídico, entre los que se incluye un aumento de la lipólisis, lo que conduciría al incremento en los niveles de AGL circulantes en esos animales (Soria, D'Alessandro, y Lombardo, 2001; D'Alessandro et al., 2015). El menor tamaño de los adipocitos del TAE y contenido de triglicéridos observado en el grupo DRS+PCr podría estar asociado a cambios en el metabolismo lipídico de las células grasas que explicarían la reducción en los niveles de AGL circulantes en ese grupo experimental.

Conclusiones

Los resultados muestran que la proteína obtenida de *Macrobrachium borellii* podría ser una potencial intervención nutricional útil en la prevención/atenuación de la adiposidad visceral, dislipidemia y control del peso corporal.

Referencias Bibliográficas

Aiassa, V., Ferreira, M.R, Villafañe, N., y D'Alessandro, M. E. (2022). α -

- Linolenic acid rich chia seed modulates visceral adipose tissue collagen deposition, lipolytic enzymes expression, insulin signaling and GLUT-4 levels in a diet-induced adiposity rodent model. *Food Research International*, 156,111164. doi:10.1016/j.foodres.2022.111164
- Carvalho, D., Reyes, P., Williner, V., Mora, M. C., Viozzi, M. F., De Bonis, C. J., y Collins, P. A. (2020). Growth, survival, body composition and amino acid profile of *Macrobrachium borellii* against the limitation of feeds with different C:N ratios with comments about application in integrated multi-trophic aquaculture. *Aquaculture Research*, 51(10), 3947-3958. doi: 10.1111/are.14696
- Chait, A., y Hartigh, L. J. D. (2020). Adipose Tissue Distribution, Inflammation and Its Metabolic Consequences, Including Diabetes and Cardiovascular Disease. *Frontiers In Cardiovascular Medicine*, 7:22. doi:10.3389/fcvm.2020.00022
- D'Alessandro, M. E., Selenscig, D., Illesca, P., Chicco, A., y Lombardo, Y. B. (2015). Time course of adipose tissue dysfunction associated with antioxidant defense, inflammatory cytokines and oxidative stress in dyslipemic insulin resistant rats. *Food and Function*, 6(4), 1299-1309. doi:10.1039/c4fo00903g
- Egbujor, M. C., Olaniyan, O. T., Emeruwa, C. N., Saha, S., Saso, L., y Tucci, P. (2024). An insight into role of amino acids as antioxidants via NRF2 activation. *Amino Acids*, 56(1). doi:10.1007/s00726-024-03384-8
- Ferreira, M. R., Alvarez, S. M., Illesca, P., Giménez, M. S., y Lombardo, Y. B. (2016). Dietary Salba (*Salvia hispanica* L.) ameliorates the adipose tissue dysfunction of dyslipemic insulin-resistant rats through mechanisms involving oxidative stress, inflammatory cytokines and peroxisome proliferator-activated receptor γ . *European Journal Of Nutrition*, 57(1), 83-94. doi: 10.1007/s00394-016-1299-5
- Gil Hernández, A. (2010). *Tratado de Nutrición. Bases fisiológicas y bioquímicas de la nutrición*. España: Editorial Médica Panamericana.
- Hosomi, R., Fukunaga, K., Arai, H., Nishiyama, T., y Yoshida, M. (2009). Effects of Dietary Fish Protein on Serum and Liver Lipid Concentrations in Rats and the Expression of Hepatic Genes Involved in Lipid

- Metabolism. *Journal Of Agricultural And Food Chemistry*, 57(19), 9256-9262. doi:10.1021/jf901954r
- Hosomi, R., Fukunaga, K., Arai, H., Kanda, S., Nishiyama, T., y Yoshida, M. (2011). Fish Protein Decreases Serum Cholesterol in Rats by Inhibition of Cholesterol and Bile Acid Absorption. *Journal Of Food Science*, 76(4), 116-121. doi:10.1111/j.1750-3841.2011.02130.x
- Juneja, L. R., Wilczynska, A., Singh, R. B., Takahashi, T., Pella, D., Chibisov, S., y Wilson, D. W. (2018). Evolutionary Diet and Evolution of Man. *Elsevier eBooks*, 71-85. doi:10.1016/b978-0-12-813148-0.00005-0
- Klop, B., Elte, J., y Cabezas, M. (2013). Dyslipidemia in Obesity: Mechanisms and Potential Targets. *Nutrients*, 5(4), 1218-1240. doi:10.3390/nu5041218
- Madani Z., Louchami K., Sener A., Malaisse W.J., y Ait Yahia D., (2012). Dietary sardine protein lowers insulin resistance, leptin and TNF- α and beneficially affects adipose tissue oxidative stress in rats with fructose-induced metabolic syndrome. *International Journal Of Molecular Medicine*, 29(2), 311-318. doi:10.3892/ijmm.2011.836
- Manna, P., y Jain, S. K. (2015). Obesity, Oxidative Stress, Adipose Tissue Dysfunction, and the Associated Health Risks: Causes and Therapeutic Strategies. *Metabolic Syndrome And Related Disorders*, 13(10), 423-444. doi:10.1089/met.2015.0095
- Oliva, M. E., Ferreira, M.R., Vega Joubert, M. B., y D'Alessandro, M. E. (2021). Salvia hispanica L. (chia) seed promotes body fat depletion and modulates adipocyte lipid handling in sucrose-rich diet-fed rats. *Food Research International*, 139(109842). doi:10.1016/j.foodres.2020.109842
- Organización Mundial de la Salud (2024). Obesidad y sobrepeso. Recuperado de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight>.
- Pilon, G., Ruzzin, J., Rioux, L. E., Lavigne, C., White, P. J., Frøyland, L., Jacques, H., Bryl, P., Beaulieu, L., & Marette, A. (2011). Differential effects of various fish proteins in altering body weight, adiposity, inflammatory status, and insulin sensitivity in high-fat-fed rats. *Metabolism: clinical and experimental*, 60(8), 1122-1130. <https://doi.org/10.1016/j.metabol.2010.12.005>
- Reeves, P. G., Nielsen, F. H., y Fahey, G.

- C. (1993). AIN-93 Purified Diets for Laboratory Rodents: Final Report of the American Institute of Nutrition Ad Hoc Writing Committee on the Reformulation of the AIN-76A Rodent Diet. *Journal Of Nutrition*, 123(11), 1939-1951. doi: 10.1093/jn/123.11.1939
- Rossi, A. S., Oliva, M. E., Ferreira, M. R., Chicco, A. y, Lombardo, Y. B. (2013). Dietary chia seed induced changes in hepatic transcription factors and their target lipogenic and oxidative enzyme activities in dyslipidaemic insulin-resistant rats. *British Journal Of Nutrition*, 109(9), 1617-1627. doi:10.1017/s0007114512003558
- Sánchez, A., Rubano, D. A., Shavlik, G. W., Hubbard, R., y Horning, M. C. (1988). Cholesterolemic effects of the lysine/arginine ratio in rabbits after initial early growth. *Archivos latinoamericanos de nutrición*, 38(2), 229–238. Recuperado de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3155291/>
- Shukla, A., Bettzieche, A., Hirche, F., Brandsch, C., Stangl, G.I., y Eder, K. (2006). Dietary fish protein alters blood lipid concentrations and hepatic genes involved in cholesterol homeostasis in the rat model. *The British Journal of Nutrition*, 96(4), 674-82. Recuperado de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17010226/>
- Soria, A., D'Alessandro, M. E., y Lombardo, Y. B. (2001). Duration of feeding on a sucrose-rich diet determines metabolic and morphological changes in rat adipocytes. *Journal Of Applied Physiology*, 91(5), 2109-2116. doi:10.1152/jappl.2001.91.5.2109
- Sugiyama, K., y Muramatsu, K. (1990). Significance of the Amino Acid Composition of Dietary Protein in the Regulation of Plasma Cholesterol. *Journal Of Nutritional Science And Vitaminology*, 36(Supplement2), 105-110. doi:10.3177/jnsv.36.supplementii_s105
- Wergedahl, H., Gudbrandsen, O. A., Muna, Z., Berge, R. K., Liaset, B., Lied, E., Espe, M., y Mørk, S. (2004). Fish Protein Hydrolysate Reduces Plasma Total Cholesterol, Increases the Proportion of HDL Cholesterol, and Lowers Acyl-CoA:Cholesterol Acyltransferase Activity in Liver of Zucker Rats. *Journal Of Nutrition*, 134(6), 1320-1327. doi:10.1093/jn/134.6.1320
- Wu, G. (2013). Functional amino acids in nutrition and health. *Amino*

Acids, 45(3), 407- 066

411. doi:10.1007/s00726-013-
1500-6

Xu, N., Chen, G., y Liu, H. (2017).
Antioxidative Categorization of
Twenty Amino Acids Based on
Experimental
Evaluation. *Molecules*, 22(12),
2066. doi:10.3390/molecules22122

Financiamiento

Este trabajo fue financiado por el Consejo
Nacional de Investigaciones Científicas y
Técnicas (CONICET), Argentina [PIP 2021-
2023 #11220200101185CO].

33.- Geotecnologías y Ciencias de la Atmósfera

Análisis de la concentración de material particulado atmosférico sedimentable en la ciudad de Coronel Bogado, Itapúa, Paraguay

Autor: Alonso Azcona, María Luján; mariaalonso757@facyt.uni.edu.py

Orientador: Alonso Duré, Jorge Alberto; jorgealonso@facyt.uni.edu.py

Universidad Nacional de Itapúa / Facultad de Ciencias y Tecnología

Resumen

La investigación tuvo como objetivo principal analizar la concentración de material particulado atmosférico sedimentable (MPS) en la zona urbana de Coronel Bogado. Para ello se realizó la descripción ambiental incluyendo actividades humanas, tipo de vías, densidad arbórea e infraestructura de cuatro puntos de muestreos (entre noviembre de 2023 a mayo de 2024). Las técnicas empleadas para la determinación de la concentración de MPS, se basaron en la Norma ASTM D 1739-98. De igual manera se los relacionó estadísticamente con los factores meteorológicos. Los resultados de concentración de MPS obtenidos en el Punto de Monitoreo 2 promediados superaron el límite permisible según la OMS de $0,5 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{mes}$, en el primer y segundo mes, al igual que el punto 1 en el sexto mes. Se ha encontrado una incidencia directa entre las fuentes antropogénicas y el incremento de la concentración de MPS. Por otro lado, los factores meteorológicos cuya correlación es alta con respecto a la concentración de MPS son la precipitación y la velocidad del viento. Se concluye que la metodología utilizada en esta investigación puede constituirse en una herramienta eficaz de monitoreo de aire y contribuir en la gestión ambiental del país.

Palabras clave: calidad, aire, partículas, material particulado atmosférico sedimentable (MPS).

Introducción

La calidad del aire es un tema de preocupación mundial ya que existen distintos factores que contribuyen a su deterioro debido al ingreso de sustancias nocivas a la atmósfera, en consecuencia, se observan efectos adversos en la salud de las personas y el ambiente. La Organización Mundial de la Salud ha señalado que la contaminación del aire es una de las principales causas de muerte en el mundo, con un estimado de 7 millones de fallecimientos anuales atribuibles a enfermedades relacionadas con la contaminación atmosférica; si no se implementan medidas contundentes para reducir las emisiones contaminantes, se proyecta un incremento en esta alarmante cifra en los próximos años (Organización Mundial de la Salud, 2018). En este sentido, resulta fundamental llevar a cabo estudios que permitan conocer las características de la calidad atmosférica en diferentes regiones y establecer medidas adecuadas para el control y reducción de su contaminación.

Uno de los contaminantes más conocidos es el Material Particulado, que se subdivide de acuerdo a su tamaño en Material Particulado Fino (PM_{2.5}) con diámetros menores o iguales a 2,5 µm, Material Particulado Respirable (PM₁₀) con diámetros menores o iguales a 10 µm y el Material Particulado Sedimentable

(MPS) que constituyen a las partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire que por acción de la gravedad tienden a depositarse en superficies y que son mayores a 10 µm. Dependiendo de dichos diámetros y de su composición las partículas pueden presentar efectos adversos severos o tolerables, crónicos o agudos (Pinto & Mendez, 2015).

En la presente investigación se aborda el estudio de la concentración de material particulado sedimentable en el aire de la zona urbana del distrito de Coronel Bogado, ubicado en el departamento de Itapúa y perteneciente a la ecorregión del Ñeembucú, es un área de 654 km² con una población de 21.047 personas en 2012, proyectada a 22.317 para el 2025. A pesar de su riqueza biológica y su idoneidad para la producción agroganadera, enfrenta serios problemas ambientales debido al crecimiento constante (Dirección General de Estadística Encuesta y Censo, 2012).

En las zonas urbanas, el tráfico comercial y las actividades como la venta de materiales de construcción y las carpinterías, contribuyen a la contaminación del aire con ruidos molestos y emisiones de gases y polvo (Bogado Coronil, 2014).

En las áreas suburbanas, el desarrollo de urbanizaciones, fábricas de ladrillos, un

matadero y un vertedero municipal han provocado la reducción de bosques, la emisión de humo y la producción de residuos peligrosos. Además, los silos y molinos generan grandes cantidades de polvo, afectando la salud de los trabajadores y la visibilidad.

La mala gestión de residuos sólidos, con la incineración a cielo abierto, y la vulnerabilidad a los incendios forestales agravan la contaminación del aire en todo el distrito. Estos contaminantes tienen efectos perjudiciales en el medio ambiente, la fauna, la flora y la economía local (Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Coronel Bogado, 2023; Prieto Peña & Yakusik Cabral, 2022). La evaluación del material particulado en el aire de Coronel Bogado es fundamental para entender la magnitud de la contaminación, identificar sus fuentes y comparar los resultados con la legislación vigente. Este estudio beneficia directamente la salud y el bienestar de los residentes, ya que proporciona información crucial para que las autoridades implementen medidas preventivas y correctivas. Además, sirve como una base de conocimientos para futuras investigaciones y como referencia metodológica para otros estudios en áreas similares.

Objetivos

General

Analizar la concentración de material

particulado sedimentable en aire en la zona urbana de Coronel Bogado.

Específicos

- Describir las características ambientales de los puntos de monitoreo de material particulado sedimentable en la zona urbana de Coronel Bogado.
- Determinar la concentración del material particulado sedimentable en la zona urbana del distrito de Coronel Bogado.
- Relacionar las concentraciones de material particulado sedimentable con los factores meteorológicos en la zona urbana del distrito de Coronel Bogado.

Materiales y Métodos

El estudio emplea una metodología descriptiva para especificar las propiedades, elementos constitutivos y el contexto de manifestación del material particulado sedimentable presente en la atmósfera. Su naturaleza mixta integra la recolección primaria de datos mediante muestreo de campo con la adquisición secundaria de información meteorológica a partir de bases de datos. El diseño no experimental se centra en la observación de fenómenos in situ, sin intervención sobre las variables. Su carácter longitudinal radica en el análisis de datos compilados a lo largo de diversos intervalos de tiempo (Rodríguez Gómez & Valldeoriola Roque, 2009).

Población y muestra

La población a la cual se aplica los resultados de investigación corresponde a la zona urbana del distrito de Coronel Bogado. Los puntos de monitoreo fueron seleccionados aplicando el método no probabilístico, el muestreo por conveniencia (Casal & Mateu, 2003).

Debido a que la población es relativamente homogénea, se tuvieron que establecer algunas características que difieren de un punto a otro, de manera a obtener mayor representatividad en los resultados, siendo estas, los tipos de camino y las actividades antropogénicas que se desarrollan en su entorno (Otzen & Manterola, 2017).

Alcance espacial del estudio

El estudio se ejecutó en el casco urbano del distrito de Coronel Bogado, en los barrios:

- Santa Clara (Punto 1)
- Santa Librada (Punto 2)
- San Blas (Punto 3)
- San Rosa (Punto 4)

Mediante el programa Sistema de Información Geográfica Cuántica (QGIS), atendiendo que el mismo abarque a los cuatro barrios principales de la zona urbana.

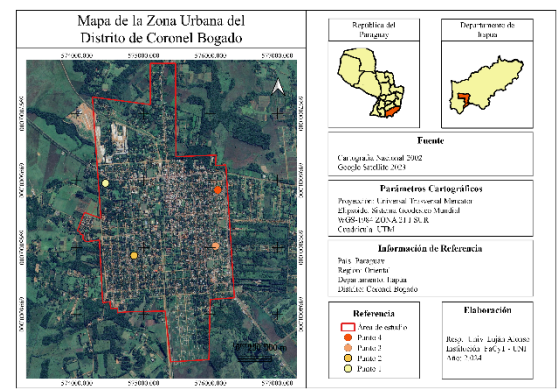


Figura 1. Mapa de la zona urbana del distrito de Coronel Bogado

Alcance temporal del estudio

El estudio de campo se inició en noviembre del año 2.023 y finalizó el mes de mayo del año 2.024. Los colectores de muestras fueron expuestos al medio durante un mes, este proceso fue repetido seis veces decidiéndose que en fecha 15 de cada mes serían retirados para ser analizados.

Equipos utilizados:

- Analíticos
- o Buchner: conectado a un Kitasato y a una bomba de para separar del solvente (Sulfato de Cobre CuSO_4 (1%), en este se debe colocar el filtro previamente pesado.
- o Kitasato: en su lateral cuenta con un tubo que permite conectarlo con una bomba de vacío que facilita la separación de los componentes sólidos (MPS) y la solución de CuSO_4 .
- o Bomba de vacío: permite una filtración con mayor rapidez.
- o Estufa de vacío: al finalizar la filtración,

los filtros deben secar en la estufa a 110°C durante media hora.

- o Desecador: este instrumento mantiene los filtros y muestras deshidratados para evitar alteraciones en los resultados.
- o Balanza: se utiliza antes y después del filtrado para conocer el peso inicial y final de los filtros.
- o Agua destilada: necesaria no solo en el laboratorio, sino durante el periodo de muestreo en el campo.
- o Filtros: este es el material que retendrá al material sólido durante la filtración.
- Informáticos
 - o Computadora: herramienta indispensable durante la redacción e implementación del trabajo de investigación.
 - o QGIS: utilizado para la delimitación espacial a fin de ubicarse se manera gráfica.
 - o Excel: registro los datos, para posteriormente procesarlos y analizarlos.
 - o AutoCAD: con esta herramienta se diseña el modelo del colector, atendiendo las dimensiones que establece la norma ASTM D 1739-98.
 - o Dirección Nacional de Aeronáutica Civil: obtención de datos diarios de las condiciones meteorológicas, tales como: temperatura, humedad, presión, precipitación, dirección del viento, velocidad del viento, y la radiación.

Técnicas y procedimientos aplicados

- Objetivo 1:

El área de influencia de cada punto de monitoreo fue limitada abarcando un radio de 56,42 m desde cada punto, es decir, extendiéndose la caracterización sobre una superficie de 1 Ha. La caracterización del ambiente se realizó mediante imágenes satelitales y salida en campo; los criterios que se tuvieron en cuenta durante la toma de muestra fueron los siguientes: la cobertura vegetal, la accesibilidad y caminos, las actividades económicas y de

Servicios. El área de influencia de los puntos de monitoreo caracterizados fue descrita siguiendo el paso 4 de la Guía para la Caracterización Ambiental Provincial emitido por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de República Dominicana, que consiste en la recopilación de la información básica y redacción (Gangotena, Lamelas, & García, 2011).

Para ello se recurrió a fuentes de información secundaria tales como: datos estadísticos y cartografías, además, se precisó de salidas de campo.

Las informaciones necesarias fueron:

- Cobertura boscosa: la descripción se realizó mediante la utilización de imágenes satelitales y su posterior verificación por medio del cálculo de densidad de cobertura boscosa, este último utilizando el método de

punto-centro-cuadrado del Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal. El método describe el establecimiento de puntos de muestreo auxiliares espaciados a intervalos de 50 m a lo largo de una línea. En cada punto, se definen cuatro cuadrantes mediante dos líneas perpendiculares. Para cada cuadrante, se identifica y mide la distancia al árbol más próximo al punto central (BOLFOR, Mostacedo, & Fredericksen, 2000). Luego se realizó el cálculo del promedio de cada distancia y se acudió por último a la fórmula:

$$Dh = \frac{10000}{Dp^2}$$

Donde:

Dh: Densidad arbórea por hectárea en árboles/Ha

Dp: Distancia promedio entre ejemplares arbóreos en m

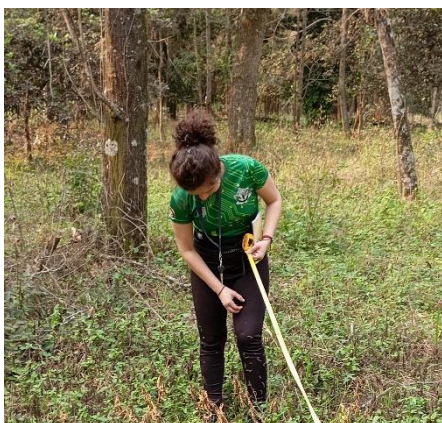


Figura 2. Toma de muestra para la determinación de la densidad de cobertura boscosa

- **Accesibilidad e infraestructura vial:** para la obtención de datos, primeramente, se determinó el límite de la superficie a describir, esto mediante la visualización en imágenes satelitales; posterior a ello se realizó una observación en campo de manera a obtener información actualizada y acertada acerca de los tipos de caminos. Este criterio fue adaptado a la Guía de Caracterización Ambiental Provincial (Gangotena et al., 2011).
- **Actividades económicas:** aquellas actividades desarrolladas en el área de influencia delimitada por una superficie de 10.000 m², debieron ser descritas atendiendo su rubro y las labores realizadas en las mismas, incluyéndose las actividades productivas y las de servicio.
- **Urbanización:** otros factores de suma importancia considerados para la descripción del entorno fueron las infraestructuras, ya que pueden incidir en la cuantificación de MPS, pueden ser vistos como obstáculos en la dispersión de dichas partículas o incluso pueden participar en la generación de las mismas consecuencias de la erosión eólica (Méndez, Lugo, & Mendoza, 2023). Los datos necesarios para la descripción de la urbanización fueron colectados por medio de salida a campo; se tomaron en cuenta las infraestructuras residenciales, debido a

que las demás ya fueron descritas en actividades económicas.

- Clima: la descripción de este es indispensable para conocer la dinámica de las partículas, los factores tanto meteorológicos como climatológicos del área de estudio fueron caracterizados de acuerdo fuentes de información secundaria (reportes DINAC) (Cuadros Baldeón, 2021).

- Elaboración de mapas

Se realizaron mapas temáticos atendiendo los criterios ya mencionados, para la elaboración de los mismos se debieron tener en cuenta los siguientes aspectos:

Año de base de datos cartográficos.

Datos topográficos, hidrográficos, vías de comunicación provenientes de cartografías.

Imágenes satelitales para la visualización de áreas boscosas.

Corroborar la presencia de áreas protegidas mediante legislación pertinente.

Identificación de industrias y otras actividades económicas.

Cabe destacar que la finalidad de este objetivo no fue conocer las fuentes de emisión de las partículas, sino caracterizar el área en donde se encontraron ubicados los colectores.

- Objetivo 2:

Se expusieron 8 (ocho) colectores, 2

(dos) en cada punto de monitoreo; estos permanecieron al aire libre con solución alguicida durante el periodo de un mes, alejados de cualquier objeto, infraestructura o vegetación que pueda interferir con los resultados; este proceso fue realizado durante seis meses, a fin de conocer las diferencias entre la cantidad de material particulado sedimentable que se genera en las distintas épocas del año.

Para la determinación del Material Particulado Sedimentable, se aplicaron las técnicas y procedimientos expuestos en la norma ASTM D 1739-98, que forma parte de la familia de normas de la American Society of Testing Materials (ASTM, 2017). Las mediciones fueron de naturaleza pasiva y los análisis basados en métodos físicos gravimétricos, el material debió ser recolectado en un recipiente de plástico de forma cilíndrica con medidas estandarizadas llamado colector (Lizalde Alvarado & Merino Jima, 2021). Se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

Solución alguicida: se precisó de 100 ml de CuSO₄ al 1% de concentración en cada colector, la función de este líquido fue la de evitar la aparición de algas y otros microorganismos (Martín, 2023).

Diseño y tamaño de los colectores: el recipiente utilizado fue de plástico de forma cilíndrica vertical, cumpliendo con las dimensiones establecidas por la Norma ASTM D 1739-98, donde la altura

debe medir mínimamente el doble del diámetro, en este caso las medidas del diámetro y la altura fueron de 210 mm y 530 mm respectivamente (Barrick Exploraciones Argentina S.A, 2008; Giménez Gallinal, 2018).

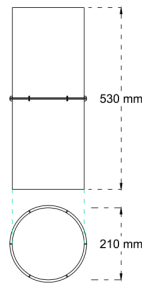


Figura 3. Dimensiones del colector de MPS

Ubicación de los colectores: se ubicaron en lugares libres de barreras que impidan el funcionamiento correcto de los mismos, mínimamente a 2 m de los demás colectores o de paredes, Los equipos de muestreo se situaron a una altura de entre 1,5 - 2 m a nivel del suelo, 10 metros alrededor de los árboles para minimizar los efectos de la evapotranspiración. Se tuvieron en cuenta los factores meteorológicos, y la cercanía a grupos sociales y ecosistemas vulnerables (Martín, 2023).

- Etapas de muestreo según (ASTM, 2017):

Lavado y etiquetado de recipientes: lavados con agua, posterior identificación con número de muestra, fecha y ubicación.

Adición de la solución alguicida: 100ml

de la solución.

Instalación de los colectores: considerando los criterios anteriores.



Figura 4. Instalación del colector

- Etapas del análisis de la muestra según (ASTM, 2017):

Determinación del peso de los filtros: cada filtro debió de ser numerado al igual que los colectores, luego se procedió al secado en una estufa por 105°C durante 30 minutos al igual que en el desecador. Los filtros se pesaron usando una balanza analítica, obteniendo el peso inicial.

Filtrado de muestra: en el embudo de Buchner fueron ubicados el papel de filtro, este equipo que estaba conectado al Kitasato.



Figura 5. Análisis físico de la muestra

Extracción de residuos: en caso de presentarse elementos ajenos a la muestra, tales como insectos, restos de vegetales y otros, se debieron de extraer.



Figura 6. Extracción de residuos

Secado: al finalizar la filtración de las muestras se debieron llevar a secar en una estufa de vacío a temperatura de 105°C durante 30 minutos, luego se depositó en un desecador durante 30 minutos.

Determinación del peso de las muestras: en la balanza analítica se repite el primer paso, pero en este caso ya con la muestra de MPS contenida en el filtro.



Figura 7. Pesaje de muestras filtradas

- Cuantificación de MPS:
La obtención de los distintos resultados

se dio mediante la utilización de las siguientes fórmulas:

Área del colector:

$$A = \pi r^2$$

Donde:

A: Área total del colector en cm².

r: Radio del cilindro en cm.

MPS total

$$MPSt = (Pf - Pi)$$

Donde:

MPSt: Material Particulado Sedimentable Total en g.

Pf: Peso final en g.

Pi: Peso inicial en g.

MPS diario

$$MPSd = \frac{MPSt}{(A.T)} \cdot 1000$$

Donde:

MPSd: Material Particulado Sedimentable Diario en mg/cm².día.

MPSt: Material Particulado Sedimentable Total en g.

A: Área total del colector en cm².

T: Periodo de exposición del colector en días.

MPS mensual

$$MPSm = MPSd \cdot T$$

Donde:

MPSm: Material Particulado Sedimentable Mensual en mg/cm².mes.

MPSd: Material Particulado Sedimentable Diario en mg/cm².día.

T: Periodo de exposición del colector en días.

MPS comparable

$$MPSc = \frac{MPSm_x + MPSm_y}{2}$$

Donde:

MPSc: Material Particulado Sedimentable Mensual Comparable en mg/cm².mes.

MPSmx: Material Particulado Sedimentable Mensual obtenido por cada colector en un determinado punto en mg/cm².mes.

El resultado de la última ecuación representó el valor comparable de cada punto de monitoreo. A su vez, cada uno de estos fue contrastado con el Límite Máximo Permissible (LMP) establecido por la Organización Mundial de la Salud, teniendo este último un valor de 0,5 mg/cm².mes.

Otros cálculos importantes a tener en cuenta durante la interpretación de resultado son: la Media Aritmética, la Mediana y Desviación Estándar; estos fueron calculados en una planilla Excel para posteriormente ser expuestos en gráficos combinados.

- Objetivo 3:
- Fuente de datos: se precisó del registro diario de los datos meteorológicos diarios desde la fecha 15 de noviembre de 2023 al 14 de mayo de 2024, emitidos por la Dirección de Meteorología e Hidrología dependiente de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil, estos fueron extraídos de la página web oficial a las 13:15 horas, debido a que en ese momento se registra mayor radiación

solar (Cuadros Baldeón, 2021).

- Cálculo de los promedios mensuales de los factores meteorológicos y de las concentraciones de MPS de cada punto de monitoreo: los valores de los datos diarios cada una de las variables meteorológicas se registraron en una planilla Excel, donde fueron procesados para la obtención de los promedios mensuales y el cálculo de correlación de Pearson. Así también, se realizó un cálculo en donde se obtengan el valor promedio de todos los valores de concentraciones obtenidos por cada colector, por lo que se utilizó el promedio del valor de Material Particulado Sedimentable Comparable. Esto se debió realizar para cada uno de los meses estudiados. Atendiendo a la siguiente Fórmula:

$$MPSp = \frac{MPSc_1 + MPSc_2 + MPSc_3 + MPSc_4}{4}$$

Donde:

MPSp: Material Particulado Sedimentable promediado mensualmente en mg/cm².mes

MPSc: Material Particulado Sedimentable Mensual Comparable en mg/cm².mes.

- Variables:

Dependiente:

Concentración de MPS (mg/cm².mes)

Independiente:

Precipitación en milímetros (mm)

Temperatura en grados Celsius (°C)

Humedad en porcentaje (%)

Presión en milímetros de mercurio (mmHg)

Dirección de viento en grados (°)

Velocidad del viento en metros por segundo (m/s)

Radiación solar en vatios por metro cuadrado (W/m²)

- Registro y correlación de datos: los datos fueron registrados en una planilla Excel permitiendo su lectura e interpretación. Se debió realizar un análisis de correlación entre los valores promedios mensuales obtenidos en los cálculos anteriores, ya sean de las concentraciones de MPS y los factores meteorológicos, para ello se utilizó una planilla Excel y el gráfico de dispersión de la misma. Este análisis además se apoyó el cálculo con el Coeficiente de Correlación de Pearson. Así también, se determinó la covarianza a fin de obtener una relación lineal entre las mismas y su dependencia inversa en caso de existencia (Chávez Pérez, 2019).

Resultados y Discusión

- Objetivo 1:

Según los datos obtenidos durante la salida a campo y el procesamiento e imágenes satelitales se pudieron describir las características del entorno; la información es presentada en la siguiente tabla:

Tabla 1. Características ambientales de los puntos de monitoreo

Característica	Fuente
Densidad de cobertura boscosa:	Cartografía
P1: 86,78 árboles/Ha	Nacional 2012
P2: 102,29 árboles/Ha	Imágenes satelitales
P3: 152,19 árboles/Ha	Observación directa
P4: 69,94 árboles/Ha	
Accesibilidad e infraestructura vial:	Cartografía
P1: caminos enripiados	Nacional 2012
P2: empedrados, caminos pavimentados y enripiados	Imágenes satelitales
P3: vías pavimentadas y empedradas	Observación directa
P4: empedrados, caminos pavimentados	
Actividades económicas y de prestación de servicios:	Observación directa
P1: centro de acopio de arroz, despensas	
P2: carpinterías, centro de distribución de alimentos	
P3: tiendas de ropa y zapatos y una casa de culto	
P4: panadería, taller mecánico, una institución educativa, el colector se encuentra instalado en la PTAP de la ESSAP	
Urbanización:	Observación directa
P1: residencias de una sola planta	
P2: residencias de una sola planta y una residencia de dos plantas	
P3: residencias de una sola planta	
P4: residencias de una sola planta, tanque de almacenamiento de la ESSAP	

Según la información recolectada de las áreas en donde se encuentran los puntos de monitoreo, se pudo determinar que las características ambientales son primordiales para conocer la influencia de las mismas en la generación de MPS. Las

actividades económicas cuya finalidad es la producción de algún bien material, así como los tipos de estructura vial son las características más resaltantes de cada uno de los puntos ya que estas difieren ampliamente de un punto a otro, en los puntos de monitoreo 1 y 2 se encuentran dos de las posibles mayores generadoras de polvo atmosférico, tal como mencionan Pamela Valenzuela y sus compañeros, los caminos sin pavimentar, los residuos industriales y demás actividades antropogénicas están directamente relacionados con el incremento de las partículas en el aire (16).

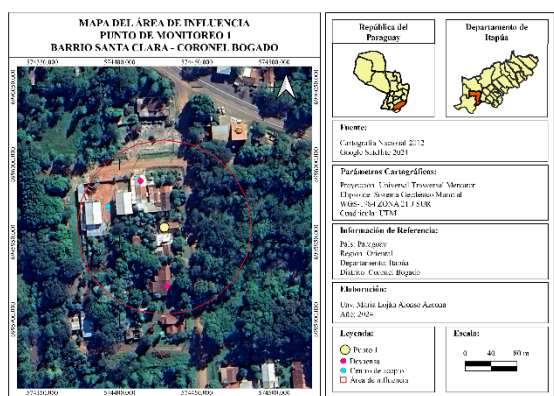


Figura 8. Mapa de influencia del P1

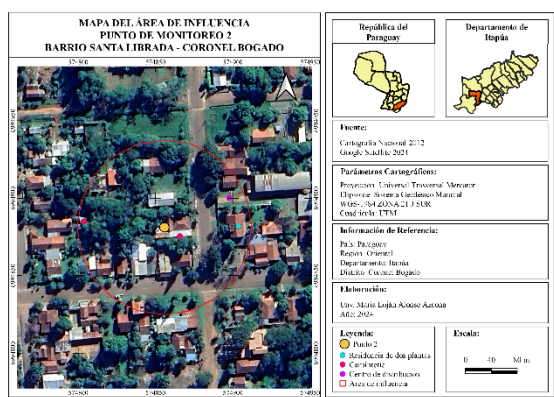


Figura 9. Mapa de influencia del P2

Las infraestructuras elevadas como las

presentes en los puntos de monitoreo 2 y 4, pueden generar áreas de sobreacumulación de contaminantes atmosféricos debido a la obstrucción de las corrientes de aire encargadas de la dispersión y disolución de los mismos, Alba Méndez, (2023) en conjunto con sus colegas se encargaron de estudiar la relación entre el crecimiento urbano y la contaminación atmosférica, donde se establece que las infraestructuras saturadas agravan las problemáticas ambientales de un territorio.

La cobertura vegetal también se encuentra relacionada con la concentración de MPS, aunque en este caso influye negativamente con su incremento, según Grassi, Rial, Sorichetti, Martín, & Díaz, (2022) mencionó que la presencia de parques o masas de vegetación pueden incidir en la cuantificación de las partículas, en el Punto de Monitoreo 3 se registró el índice mayor de densidad arbórea, por lo que este dato puede determinar la compresión de los resultados de concentración de MPS de dicho punto, respecto a los demás.

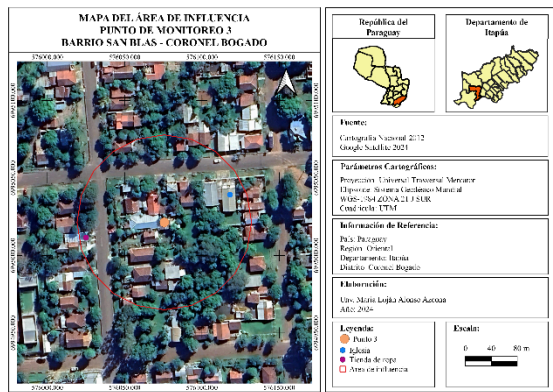


Figura 10. Mapa de influencia del P3

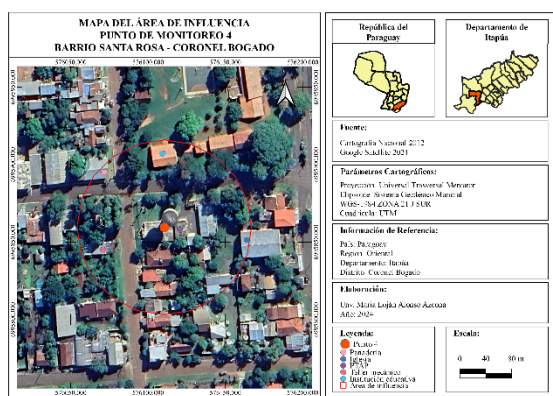


Figura 11. Mapa de influencia del P2

Las características climatológicas de un territorio pueden influir en la concentración de MPS, dependiendo de los factores presentes el comportamiento de las partículas puede ser distinta. El distrito de Coronel Bogado al poseer grandes volúmenes de precipitaciones anuales puede incidir, negativamente en la concentración de MPS en la atmósfera, facilitando la deposición del mismo al suelo. Así también, las corrientes de viento presentes pueden ocasionar el transporte y dispersión de las partículas, de manera a evitar la acumulación en la zona urbana. La temperatura no siempre se encuentra relacionada con la

generación de partículas según las conclusiones de Erlan Cuadros, (2021). Aun así, esta puede ser determinante de manera indirecta, pudiendo incidir en las condiciones de otros factores meteorológicos relacionados con la concentración de MPS.

Tabla 2. Características climatológicas del área de estudio

Característica	Fuente
Temperatura media y anomalía:	DMH-DI
2022: temperatura media entre 21-22°C, sin anomalía.	NAC
2023: temperatura media entre 22-23°C, aumento de 0,5°C	
Periodo de muestreo: temperatura promedio de 29,42°C	
Precipitación total y anomalía:	DMH-DI
Las precipitaciones anuales promedio entre el 2022 y 2023 oscilan en 1400-2000 mm	NAC
2022: anomalía de -200 a -300 mm	
2023: anomalía de 500 a 400 mm	
Dirección y velocidad del viento predominante:	DMH-DI
Dirección: Sureste, 137°	NAC
Velocidad: 4,3 m/s	

• Objetivo 2:

La **Figura 7** muestra la evolución de la concentración de MPS en los cuatro puntos de monitoreo durante un período de seis meses. Se puede observar que las concentraciones de MPS fluctúan a lo largo del tiempo y entre los diferentes puntos de monitoreo. Algunas concentraciones superan el límite establecido, lo que indica que la calidad del aire en esos puntos y momentos pudieron tener efectos dañinos para la

salud.

Durante el primer y segundo mes de monitoreo en el Punto de Monitoreo 2 (P2) se excedió el límite máximo permisible, esto pudo deberse a las actividades desarrolladas a cercanías del mismo, durante la caracterización del área de influencia se menciona la presencia de dos carpinterías y un centro de distribución de mercaderías. Estos primeros pudieron influir directamente en el aumento de la concentración de MPS, los procesos realizados para la elaboración de algún producto son generadores de grandes volúmenes de polvo. El paso constante de los camiones de reparto pertenecientes a la distribuidora, debido a la naturaleza pesada de sus cargas, podría haber ocasionado la movilización de partículas del suelo, aumentando así la concentración de contaminantes en el aire considerando que la infraestructura vial del área descrita.

En el sexto mes de monitoreo las concentraciones de MPS se vieron superadas para el punto de monitoreo 1 (P1), durante la caracterización del área de influencia de este se menciona la presencia de un centro de acopio de arroz. Las actividades económicas, principalmente las industriales son las mayores generadoras de polvo atmosférico según los estudios de monitoreo de MPS, principalmente

aquellas cuyas actividades son el procesamiento de cereales (19).

Los efectos adversos por la presencia elevada de MPS en cercanías de las urbanizaciones son variados, tal como mencionan Juan Carranza y sus colegas en su investigación realizada en el año (2021), originando efectos en la salud de las personas involucradas en las actividades generadoras de polvo o las que se encuentran expuestas indirectamente, otros efectos se ven en el medio ambiente e incluso a las infraestructuras cercanas a los puntos de emisión (8, 17).

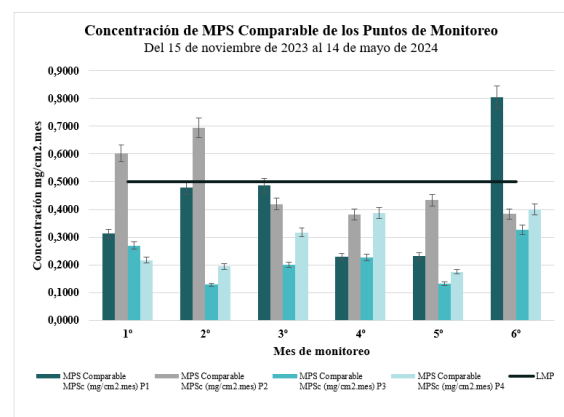


Figura 12. Concentración de MPS comparable de los puntos de monitoreo durante el periodo de estudio

El análisis de los datos de todos los puntos de monitoreo revela que, en promedio, los niveles de MPS no excedieron los límites establecidos en ningún momento del estudio. Si bien hubo fluctuaciones en las mediciones individuales, la calidad del aire general es satisfactoria para el desarrollo urbano

(Figura 8).

Las condiciones climáticas locales, como el viento y la lluvia pudieron contribuir con la advección y el intercambio vertical de los contaminantes. Así también, la cobertura vegetal pudo haber actuado como filtros naturales, jugando un papel importante en la dispersión y reducción de las partículas emitidas en los distintos puntos. La sinergia entre las condiciones climáticas y la vegetación fue clave para mejorar la calidad del aire.

Según lo mencionado por Daniel Barra, (2019), la descontaminación teniendo en cuenta el arbolado urbano es un tema aun controversial pero no se descarta la contribución del mismo en la reducción de contaminantes atmosféricos.

Los resultados de los cálculos de densidad arbórea demuestran que en el punto (P3)

en donde esta es mayor se presenta menor concentración de MPS, aunque este no es el único factor determinante, ya que el Punto de Monitoreo 3 no se encuentran instalaciones dedicadas a la producción o procesamiento de algún bien generador de polvo.

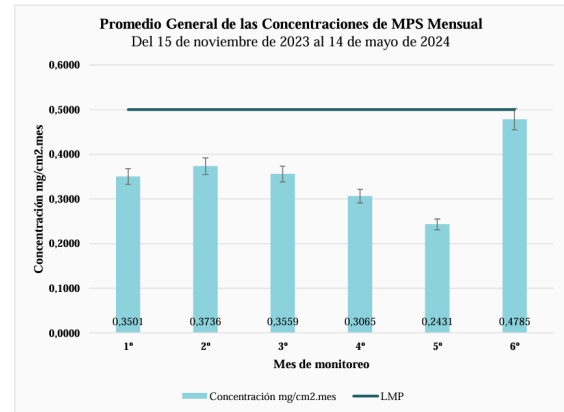


Figura 13. Promedio general de concentraciones de MPS Mensual

● Objetivo 3:

En las Tablas 3 y 4, se observan las concentraciones de MPS promedios, así como los valores de las variables meteorológicas registradas durante el periodo de investigación. Los datos fueron procesados a fin de obtener la correlación de Pearson entre las variables dependientes (concentración) y las variables independientes (factores meteorológicos).

Tabla 3. Concentraciones de MPS y factores meteorológicos promedios del primer trimestre

Mes	1°	2°	3°
Concentración mg/cm².mes	0,3501	0,3736	0,3559
Precipitación mm	6,91	4,36	3,55
Temperatura °C	28,87	30,98	32,54
Humedad %	69	67	61
Presión hPa	996,42	997,89	966,5
Dirección del viento	130	167	176
Velocidad del viento m/s	4,91	3,9	3,73
Radiación W/m²	659,01	877,62	823,04

Tabla 4. Concentraciones de MPS y factores meteorológicos promedios del segundo trimestre

Mes	4°	5°	6°
Concentración mg/cm ² .mes	0,3065	0,2431	0,4785
Precipitación mm	3,82	2,3	8,84
Temperatura °C	30,78	28,88	24,5
Humedad %	69	79	75
Presión hPa	999,66	998,68	992,68
Dirección del viento	127	114,21	108
Velocidad del viento m/s	3,79	2,58	6,88
Radiación W/m ²	764,36	407,86	341,31

Los factores meteorológicos que tuvieron correlación alta positiva con la concentración de MPS fueron la precipitación y la velocidad del viento. Los demás factores evaluados en esta investigación representaron una correlación débil a muy débil negativa como el caso de la temperatura, humedad y presión atmosférica. Tanto la dirección del viento como la radiación tienen relación casi nula con el nivel de concentración de MPS.

Tabla 5. Correlación de los parámetros meteorológicos promedio y la concentración de MPS promedio mensuales

Parámetro	Correlación
Precipitación	R ² : 0,7298
Temperatura	R ² : 0,2838
Humedad	R ² : 0,0265
Presión atmosférica	R ² : 0,0383

Dirección del viento	R ² : 0,00005
Velocidad del viento	R ² : 0,8441
Radiación	R ² : 0,0202

Con los resultados obtenidos se deduce que la precipitación contribuye a que las partículas de polvo puedan ser depositadas en el suelo por impacto del agua en sus superficies. Patricia Chávez, menciona que la precipitación y la concentración de MPS presentaron correlación alta negativa, es decir, mientras mayores volúmenes se precipitara existiese, menores serían las concentraciones de MPS (Flores, Sukla, Wang, & Hernández, 2011). En este caso lo establecido en la presente investigación y las demás no coinciden, esto pudo deberse a las condiciones ambientales del área de estudio, la cobertura vegetal y a las periodicidades, actividades de las fuentes de emisión de MPS, así como la distancia entre las fuentes y el punto de monitoreo.

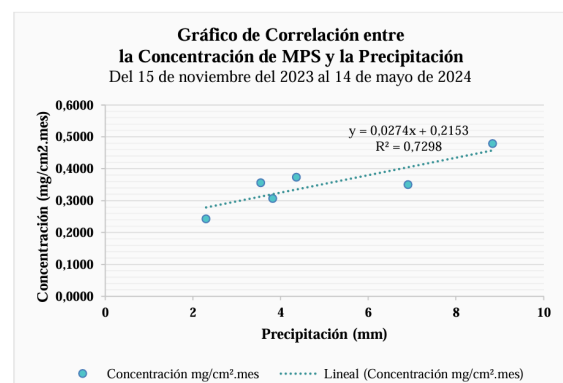


Figura 14. Correlación entre la concentración de MPS y la precipitación

La velocidad del viento posee una fuerte correlación positiva con la

concentración de MPS, esto se entiende a que cuanto mayores son la velocidad del viento, mayores serán las concentraciones de MPS en el aire. Esto pudo deberse a que el viento tiene la capacidad de movilizar las partículas, y dependiendo de la predominancia de la dirección del mismo, pudo contribuir al transporte de los contaminantes hacia los puntos de monitoreo. Según las conclusiones de la investigación realizada por Alvaro Arrieta (2016), la velocidad del viento poseen un efecto directo en la dispersión de contaminantes, especialmente el material particulado fino y respirable. Igualmente, el viento puede influir en la dispersión y deposición de MPS, atendiendo siempre las características ambientales y topográficas del entorno, como bien se mencionó, la zona urbana del distrito de Coronel Bogado se encuentra el punto más alto, destacándose por ondulaciones muy leves, lo que podría explicar la incidencia positiva del viento en el aumento de la concentración de MPS (Instituto Nacional de Estadística, 2022; Observatorio DKV de Salud y Medio Ambiente, 2010).

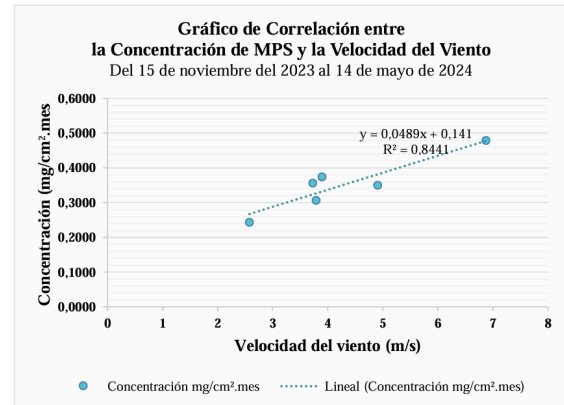


Figura 15. Correlación entre la concentración de MPS y la velocidad del viento

La humedad al tener una relación negativa muy débil indica que al aumentar la humedad del ambiente la cantidad de MPS se reduce mínimamente, coincidiendo con la conclusión final de Erlan Cuadros (2021). Teniendo también el mismo efecto la variación de la temperatura y presión atmosférica; aun así, dependiendo de las condiciones topográficas, estructurales y de la densidad vegetal, así como la de variaciones o irregularidades atmosféricas que inviertan el comportamiento regular de la atmósfera.

La concentración de MPS y la dirección del viento no están directamente relacionadas, en este caso se debe considerar los posibles obstáculos que restringen o bloquean el flujo de aire, es por ello que este factor no es representativo en el análisis de la concentración de MPS (Arrieta Fuentes, 2016).

La radiación es un factor que también representa una nula relación con la concentración de MPS, aunque tenga incidencia en el movimiento de masas de aire, así como en las reacciones fisicoquímicas que ocurren en la atmósfera; la influencia en el transporte y deposición de las partículas estudiadas es imperceptible (Figueroa & Dávila, 2004).

Conclusiones

Promediando mensualmente todos los valores obtenidos en los puntos de monitoreo se determina que en ninguno de los meses estudiados la concentración de material particulado sedimentable superó el LMP establecido por la OMS y cuyo valor es de 0,5 mg/cm².mes, y que las concentraciones varían de un punto a otro, debido principalmente a las actividades desarrolladas en cada uno de los entornos de los puntos de monitoreo.

Un hallazgo atípico en este estudio fue el comportamiento de la precipitación. A diferencia de lo que se suele observar en la literatura consultada, donde la lluvia tiende a reducir la concentración de MPS, en este caso se notó un aumento de MPS con el incremento de las precipitaciones. Este fenómeno podría atribuirse a las condiciones climáticas particulares del área de estudio, que se distingue de las regiones con escasa lluvia donde se han realizado la mayoría de las investigaciones previas sobre este tema.

Mediante la implementación de la Norma ASTM D 1739-98 se pudo obtener datos viables, acerca de la calidad de aire en la zona urbana del distrito; de manera a que los mismos puedan ser utilizados como base para posteriores estudios, así como acciones que contribuyan a la toma de decisiones temprana por parte de las autoridades a fin de mantener las condiciones óptimas del aire respirable.

En síntesis, las condiciones de calidad de aire en el área de estudio aún se encuentran dentro de los límites recomendables de exposición emitido por la OMS. De igual manera, sería oportuno tomar acciones individuales y colectivas en aquellos puntos o áreas del distrito donde se encuentren focos de emisión de MPS y que presenten características parecidas a los puntos de monitoreo 1 y 2.

Referencias Bibliográficas

- Arrieta Fuentes, A. J. (2016). Dispersión de Material Particulado (PM10), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos. *Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 43–54. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6096112>
- ASTM. (2017). ASTM D-1739-98 Standard Test Method for Collection and Measurement of Dustfall (Settleable Particulate Matter). Estados Unidos. Retrieved from

- <https://doi.org/10.1520/D1739-98R17.2>
- Barra, I. (2019). *Análisis del efecto del arbolado urbano sobre la absorción de material particulado respirable (Mp 2,5), mediante el software I – Tree eco al interior del parque Ecuador en la ciudad de Concepción*. Universidad de Chile. Retrieved from <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/170493/analisis-del-efecto-del-arbolado-urbano-sobre-la-absorcion-de-material-particulado.pdf?sequence=1>
- Barrick Exploraciones Argentina S.A. (2008). *Mediciones de polvo sedimentable en las cercanías del Glaciar Guanaco: Area proyecto Pascua-Lama*. Retrieved from <http://serviciosmineria.sanjuan.gob.ar/pascualama/glaciarguanaco/Informes/BeasaGuanaco2008.pdf>
- Bogado Coronil, C. R. (2014). *Tras las Huellas de Coronel Bogado*. Coronel Bogado: Serigraf S.R.L.
- BOLFOR, Mostacedo, B., & Fredericksen, T. (2000). *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal*. (D. Nash, Ed.) (Editora El). Santa Cruz de la Sierra: U.S. Agency for International Development. Retrieved from https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/Pnacl893.pdf
- Carranza, J., Choque, K., Mallea, M., Rojas, A., & Valverde, S. (2021). *La incorporación del Material Particulado Sedimentable como parámetro en el ECA Aire para la evaluación ambiental. Proyecto de investigación para la fiscalización ambiental*. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. Retrieved from <https://repositorio.oefa.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12788/153/GrupoNro4-CarranzaJ%3BChoqueK%3BMalleaM%3BRojasA%3BValverdeS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Casal, J., & Mateu, E. (2003). Tipos de muestreo. *Rev. Epidem. Med. Prev.*, 1(1), 3–7. Retrieved from https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/55524032/TiposMuestreo1-libre.pdf?1515813042=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DTIPOS_DE_MUESTREO.pdf&Expires=1722205706&Signature=HBzTXKfjolRWz5NLKaStE~pEqb5bMut8ybWtWRbjwd5BclRUR232F639n6S0kIPi2-u~WB
- Chávez Pérez, P. (2019). *Contaminación del Aire por Material Particulado Sedimentable en la Zona Urbana de Huánuco de agosto a octubre del 2016*. Facultad De Zootecnia. Universidad Nacional Agraria De La Selva. Retrieved from

- <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1507>
- Cuadros Baldeón, E. H. (2021). *Factores meteorológicos y su relación con la calidad del aire producido por PM 10 generado en la fabricación de ladrillo artesanal en Cullpa Baja, 2017*. Universidad Continental. Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental. Retrieved from <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/9782>
- Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Coronel Bogado. (2023). Registro de incendios forestales en el distrito de Coronel Bogado. Coronel Bogado, Paraguay.
- Dirección General de Estadística Encuesta y Censo. (2012). *Atlas Cartográfico del Paraguay, 2012* (Milciades). Retrieved from Fernando de la Mora: <https://www.ine.gov.py/Publicaciones/Biblioteca/atlas-cartografico/Atlas Cartografico del Paraguay, 2012.pdf>
- Figueruelo, J. E., & Dávila, M. M. (2004). Balance energético. In *Química Física del Ambiente y de los Procesos Medioambientales* (Editorial, pp. 13–18). Retrieved from <https://www.perlego.com/book/2037388/qumica-fsica-del-ambiente-y-de-los-procesos-medioambientales-pdf>
- Flores, J., Sukla, M., Wang, J., & Hernández, B. (2011). Material particulado dispersado al aire por vehículos en caminos agrícolas no pavimentados. *Terra Latinoamericana*, 29(1), 23–34. Retrieved from <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v29n1/2395-8030-tl-29-01-00023.pdf>
- Gangotena, J., Lamelas, R., & García, R. (2011). Guía para la caracterización ambiental provincial. *Race Questions, Provincialism, and Other American Problems*. Santo Domingo de Guzmán, República Dominicana: Biblioteca Virtual de Educación Ambiental. Retrieved 22 June 2023 from https://bvearmb.do/bitstream/handle/123456789/3073/Guia_para_la_caracterizacion_ambiental.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Giménez Gallinal, M. J. (2018). *Análisis de la afectación por Material Particulado, período 2017, Puerto Quequén*. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Retrieved from <https://www.ridaa.unicen.edu.ar/items/b85e1b6b-f4e2-4e33-bc71-998b3cfe45fd>
- Grassi, Y., Rial, J., Sorichetti, A., Martín, F., & Díaz, M. (2022). Monitoreo de material particulado sedimentable en el aire circundante del predio Alem de la Universidad Nacional del Sur. In *VIII Congreso Argentino de la*

- Sociedad de Toxicología y Química Ambiental*. Mar del Plata: Conicet. Retrieved from https://www.conicet.gov.ar/new_scp/detalle.php?keywords=&id=55586&congresos=yes&detalles=yes&congr_id=11286432
- Instituto Nacional de Estadística. (2022). Censo de Población y Vivienda, 2002. Retrieved 15 December 2023, from http://www.ine.gov.py:81/anda/index.php/catalog/136/data-dictionary/F4?file_name=Viviendas 2002
- Lizalde Alvarado, P. E., & Merino Jima, J. J. (2021). *Determinación y caracterización del material particulado sedimentable generado por actividades antropogénicas en el perímetro urbano del Cantón Chambo*. UNACH. Universidad Nacional de Chimborazo. Retrieved from <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/7646/1/06678.pdf>
- Martín, F. (2023). Material Particulado Sedimentable-Monitoreo y Determinación Analítica. Bahía Blanca, Argentina.
- Méndez, A., Lugo, R., & Mendoza, D. (2023). La incidencia de la aglomeración urbana en la distribución espacial de emisiones contaminantes del aire. *Estudios Económicos*, 38(1), 69–101. Retrieved from <https://doi.org/https://doi.org/10.24201/ee.v38i1.436>
- Oberservatorio DKV de Salud y Medio Ambiente. (2010). Contaminación atmosférica y salud. *Observatorio Dkv De Salud Y Medio Ambiente*, 2, 1–74. Retrieved from http://ecodes.org/component/option,com_phocadownload/Itemid,446/id,22/view,category/#
- Organización Mundial de la Salud. (2018). Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado. Retrieved 10 May 2023, from <https://www.who.int/es/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action#:~:text=La OMS estima que cerca,%2C cardiopatías%2C cáncer de pulmón%2C>
- Otzen, T., & Manterola, C. (2017). Técnicas de Muestreo sobre una Población a Estudio. *International Journal of Morphology*, 35(1), 227–232. Retrieved from <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0717-95022017000100037>
- Pinto, C., & Mendez, J. F. (2015). *Evaluación del Impacto En Calidad del Aire, asociado a Resuspensión de Material Particulado por la Pavimentación de la Vía Principal De*

Caracolí – Ciudad Bolívar, Bogotá D.C. Universidad de la Salle. Universidad de la Salle. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2014.04.012> <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.12.026> <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2015.04.023> <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2015.03.003> <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.04.370> <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.04.370>
Prieto Peña, L. S., & Yakusik Cabral, N. B.

(2022). *Análisis de la descarga de lixiviado proveniente del vertedero de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Coronel Bogado, en el agua y suelo del área de influencia.* Universidad Nacional de Itapúa.

Rodríguez Gómez, D., & Valdeoriola Roque, J. (2009). *Metodología de la investigación. Universitat Oberta de Catalunya.* www.uoc.edu. Retrieved from <https://doi.org/00148555>

30. Productos naturales bioactivos y sus aplicaciones

Efecto inhibitorio in vitro del extracto acuoso e hidroalcohólico de *Matricaria chamomilla* L. en cepas patrones

Autor: Ávalos Duarte, Nicolás Emanuel; neavalosd@medicina.uni.edu.py

Co-autores: Araujo Velázquez, Jerutí Belén; Brítez Bogado, Yomara Aylén; Dohmen Ayala, Camila Alejandra; Enriquez Rivarola, Gloria Mabel; Fuentes Rojas, Augusto Sebastián; Palacios Godoy, Natalia Noemí

Orientadora: Lezcano Maciel, María Teresa; mtlezcano@medicina.uni.edu.py

Universidad Nacional de Itapúa / Facultad de Medicina

Resumen

Desde hace tiempo se recurre a plantas medicinales como tratamiento a dolencias. *Matricaria chamomilla* L. (manzanilla) es una hierba popular de distribución global. La identificación de compuestos en ella, que inhiban el crecimiento de cepas ATCC (*American Type Culture Collection*) puede conducir al desarrollo de nuevos antimicrobianos, siendo esto crucial en el contexto de la resistencia antimicrobiana. Se diseñó un estudio observacional, descriptivo, de corte transversal con componente analítico, en el que se evaluó el efecto inhibitorio de los extractos acuoso e hidroalcohólico de *M. chamomilla* L. sobre cepas ATCC. Los extractos se obtuvieron mediante maceración de 3 g de flores de la planta con solventes acuoso e hidroalcohólico al 70%. Se extrajo el sobrenadante con el cual se trabajó. Se inocularon, durante 24 horas a 35 °C, placas de agar sangre con las siguientes cepas: *Streptococcus pneumoniae* ATCC® 29212™, *Klebsiella pneumoniae* ATCC® 700603™, *Escherichia coli* ATCC® 35218™ y 25922™, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC® 27558™, *Staphylococcus aureus* ATCC® 25923™, 43300™ y 29213™ y *Candida parapsilosis* (ATCC® 22019™). La actividad antimicrobiana se evaluó con discos de papel filtro impregnados con los extractos, y sembrados en agar Mueller Hinton. Se midió el halo producido, donde la lectura mayor a 6 mm corresponde a inhibición. Resultó que el extracto acuoso fue efectivo, en contraste con el hidroalcohólico que presentó menor inhibición, lo que sugiere que los compuestos bioactivos podrían ser más eficaces en soluciones acuosas. Además, se observó actividad antifúngica frente a *C. parapsilosis* con el extracto acuoso. Estos hallazgos sugieren que el extracto acuoso de *M. chamomilla* tiene potencial como antimicrobiano.

Palabras clave: *Matricaria chamomilla* L, extractos, antimicrobianos

Introducción

Desde tiempos inmemorables nuestros ancestros han recurrido a las plantas medicinales como tratamiento a distintas dolencias. Gracias a los conocimientos botánicos tras pasados por generaciones, estos elementos naturales han servido de base para el desarrollo de farmacoterapia.

La *Matricaria chamomilla* L. (manzanilla) es una medicina herbaria popular de la familia *Asteraceae* que se distribuye en todo el mundo. Hoy en día es una planta medicinal apreciada y utilizada en la medicina popular y tradicional para el tratamiento de un cierto número de patologías, especialmente diabetes e inflamación crónica, pero también puede usarse para tratar cólicos, flatulencias, histeria y fiebre intermitente. (Qasem *et al.*, 2022)

Las dos variedades más comunes en la terapéutica son la manzanilla alemana o *Matricaria chamomilla* L. y la manzanilla romana o *Chamaemelum nobile* L. Los componentes responsables de dar a esta planta sus propiedades medicinales son flavonoides, terpenoides y cumarinas. La misma cuenta con papel terapéutico en diversas áreas como agente antiinflamatorio, antioxidante, analgésico, antimicrobiano, hepatoprotector, antialérgico, anticancerígeno y antihipertensivo. (Sah *et al.*, 2022)

Actualmente, con la práctica inconsciente de la automedicación, se ha

desarrollado una emergencia debido al aumento de resistencia bacteriana contra drogas antibióticas. Esto refleja la necesidad de buscar otras rutas en la lucha contra estos microorganismos patógenos, una de ellas es la medicina tradicional por medio de las hierbas.

Una característica y aplicación importante de los aceites esenciales de *M. chamomilla* L. es su fuerte actividad antimicrobiana, incluidos efectos antibacterianos y antifúngicos sin el desarrollo de resistencia microbiana (Das *et al.*, 2019). Investigaciones recientes han demostrado que *M. chamomilla* L. "Manzanilla" exhibió un potencial antibacteriano contra bacterias Gram positivas y Gram negativas. También mostró actividad contra bacterias resistentes a los antibióticos, incluido *Staphylococcus aureus* MRSA y *Pseudomonas aeruginosa* resistente a múltiples fármacos. Por otro lado, el aceite esencial y extractos de *M. chamomilla* L. exhibieron actividad antifúngica contra varias cepas de hongos, especialmente contra *Candida* sp. y *Aspergillus* sp. (El Mihaoui *et al.*, 2022)

La composición fitoquímica de los aceites esenciales y extractos de *M. chamomilla* ha sido muy analizada, demostrando que contiene más de 120 constituyentes. Los aceites esenciales generalmente están compuestos por terpenoides, como el α -bisabolol y sus

óxidos A y B, el óxido de bisabolona A, el camazuleno y el β -farneseno, entre otros compuestos. Por otro lado, los extractos de *M. chamomilla* L. estaban dominados por compuestos fenólicos, incluidos ácidos fenólicos, flavonoides y cumarinas. (El Mihyaoui *et al.*, 2022)

Otros estudios sobre el aceite volátil de manzanilla han demostrado un efecto antiinfeccioso sobre el crecimiento de hongos y bacterias. Reduce eficazmente la proteasa en los ácaros y puede usarse para tratar la urticaria. La hemoglobina corpuscular media-ampicilina 1 (MCh-AMP1), un péptido natural de la planta, tiene actividad antifúngica de amplio espectro contra mohos y levaduras patógenos humanos. Mata a *Candida albicans* aumentando la permeabilidad de la membrana celular e induciendo la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS). (Dai *et al.*, 2022)

Una investigación realizada en el año 2021 evaluó la actividad antibacteriana del extracto etanólico de manzanilla alemana contra *Staphylococcus aureus* resistente a la metilicina (SARM) y *Pseudomonas aeruginosa* multirresistente (MDR). Los resultados demostraron que el extracto de flores de manzanilla de 20 cepas SARM aislados, demostró un efecto inhibitorio sobre 7 cepas de SARM. (Ahani Azari & Danesh, 2021)

Se determinó la concentración mínima inhibitoria y concentración bactericida

mínima del extracto de flores de manzanilla en concentraciones de 6,25 y 12,5 mg/ml para 14 cepas aisladas de SARM, mientras que estos valores fueron de 12,5 y 25 mg/ml para 6 cepas aisladas de SARM. Mientras que con el extracto de hojas de manzanilla estos valores fueron de 12,5 y 25 mg/l para 7 SARM, respectivamente. Sin embargo, ningún extracto tuvo un efecto inhibitorio frente a cepas MDR *Pseudomonas aeruginosa*, aunque el extracto de las hojas de manzanilla ejerció un efecto de control. (Ahani Azari & Danesh, 2021)

Un estudio realizado en 2020 analizó los efectos hepatoprotectores del extracto de manzanilla en ratas con daño hepático inducido. Los resultados indicaron que el extracto de manzanilla protegía significativamente al hígado al reducir los niveles de enzimas hepáticas y estrés oxidativo. (Srivastava *et al.*, 2020)

Las plantas producen metabolitos secundarios útiles no solo como compuestos de defensa contra herbívoros y otras plantas y microbios, sino también como compuestos señalizadores. En general, los metabolitos secundarios exhiben unas propiedades biológicas y farmacológicas. Debido a esto, algunas plantas o productos aislados de ellas se han utilizado y se siguen utilizando para tratar infecciones, trastornos de salud o enfermedades. En los extractos de *M. chamomilla* L. (manzanilla) predominan

componentes fenólicos, terpenoides, polisacáridos y, además se evidencian interacciones covalentes, propiedades que le dan a esta planta, un amplio poder terapéutico contra bacterias y hongos. (Müller & Wink, 2020)

Los aceites esenciales han sido utilizados ampliamente a lo largo de la historia de la humanidad, cubren una amplia gama desde fines terapéuticos, higiénicos y hasta espirituales. Los aceites esenciales de la manzanilla se caracterizan por generar estrés oxidativo relacionado con el anión superóxido y el peróxido, lo que podría señalar el principal modo de acción que posee su aceite esencial. (Jäger & Biggs, 2021)

Finalmente, el uso popular de la manzanilla en infusiones para propósitos medicinales sigue siendo muy común. Las flores de esta planta contienen compuestos fenólicos como flavonoides (apigenina, quercetina, luteolina) y terpenoides (α -bisabolol, camazuleno), lo que le confiere propiedades antioxidantes, antimicrobianas, antiinflamatorias y antiespasmódicas. Aunque algunos estudios han demostrado su acción antimutagénica, antiinflamatoria y ansiolítica en modelos animales, los estudios clínicos en humanos aún son limitados, especialmente en relación a sus propiedades sedantes. (Ayoughi, Barzegar, Sahari & Naghdibadi, 2011)

Justificación

La identificación de compuestos en la *Matricaria chamomilla* L., que inhiban el crecimiento de cepas ATCC puede conducir al desarrollo de nuevos agentes microbianos, siendo esto sumamente relevante en el contexto actual de la resistencia antimicrobiana. Dado que la resistencia bacteriana frente a drogas antibióticas es un problema de salud pública que va en aumento, es preciso investigar el potencial que posee esta hierba como una alternativa accesible y efectiva para tratar infecciones bacterianas y fúngicas que evolucionaron como resistentes a antibióticos y antifúngicos.

Los resultados de este estudio brindan información que puede abrir camino a futuras investigaciones y ser útil tanto para la comunidad científica como para la sociedad al ahondar un problema de relevancia médica y científica

Objetivos

General

Determinar los efectos inhibitorios de los extractos acuoso e hidroalcohólico de *M. chamomilla* L. (Manzanilla) sobre cepas ATCC.

Específicos

Evaluar el efecto inhibitorio del extracto acuoso de *Matricaria chamomilla* L. sobre las cepas estudiadas.

Evaluar el efecto inhibitorio del extracto hidroalcohólico de *Matricaria chamomilla*

L. sobre las cepas estudiadas.

Comparar la eficacia inhibitoria de los extractos acuoso e hidroalcohólico de *Matricaria chamomilla* L. sobre las cepas estudiadas.

Materiales y Métodos

Estudio de tipo observacional, descriptivo, de corte transversal con componente analítico, realizado en el Laboratorio de la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional de Itapúa, Encarnación, Paraguay.

Se utilizaron para el estudio cepas ATCC del Hospital Regional del Instituto de Previsión Social de Encarnación.

El muestreo fue no probabilístico por conveniencia, y se han planteado las hipótesis:

- Hipótesis nula (H_0): No hay diferencia significativa en el diámetro de inhibición entre el extracto acuoso e hidroalcohólico.

- Hipótesis alterna (H_1): Sí hay una diferencia significativa entre ambos extractos.

Para verificar esta hipótesis se ha realizado una prueba T de student para muestras pareadas.

Reclutamiento

El extracto de *Matricaria chamomilla* L. (Manzanilla) se obtuvo como donación del laboratorio de bioterio de la Universidad Nacional de Itapúa.

Las cepas ATCC fueron proveídas por el Laboratorio del Hospital Regional del

Instituto de Previsión Social de Encarnación.

Manual de procedimientos

Se pesaron 3 g de las flores de la planta, previo lavado con agua destilada 6 veces. Se aplicó la técnica de maceración (24 horas) con solventes acuoso e hidroalcohólico al 70%. Se extrajo el sobrenadante de la *Matricaria chamomilla* L., con el cual se trabajó impregnando discos de papel filtro, previa esterilización de estos con calor húmedo. Para la preparación del inóculo, se realizó la siembra en placas de agar sangre de las cepas *Streptococcus pneumoniae* ATCC® 29212™, *Klebsiella pneumoniae* ATCC® 700603™, *Escherichia coli* ATCC® 35218™ y 25922™, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC® 27558™, *Staphylococcus aureus* ATCC® 25923™, 43300™ y 29213™ y *Candida parapsilosis* ATCC® 22019™, durante 24 horas a 35 °C de incubación en estado logarítmico de crecimiento.

Se procedió a la suspensión con lectura por turbidimetría a las concentraciones 0,5 de la escala de McFarland en agua destilada estéril.

Para la preparación de las placas, se utilizó agar Mueller Hinton (17 ml por placas). Se efectuó la siembra en tres estrías con ayuda de hisopos estériles de los inóculos correspondientes a los discos de papel filtro embebidos en los diferentes extractos. La incubación de las placas fue

de 24 horas a 35 °C y posteriormente, se realizó la lectura con ayuda de una regla milimétrica, observando el aumento del halo producido por el extracto. Luego, se evaluó la diferencia en milímetros correspondiente al control.

Resultados

Tabla 1. Diámetros de inhibición obtenidos con el extracto acuoso de *M. chamomilla* L. (n=9)

Cepa	Diámetro (mm)
<i>S. pneumoniae</i> 29212	13,66
<i>K. pneumoniae</i> 700603	7,25
<i>E. coli</i> 35218	20,5
<i>E. coli</i> 25922	19,16
<i>P. aeruginosa</i> 27558	12,83
<i>S. aureus</i> 25923	15
<i>S. aureus</i> 43300	7,75
<i>S. aureus</i> 29213	19
<i>C. parapsilosis</i> 22019	13,33

Fuente: Datos obtenidos en el Laboratorio de la Facultad de Medicina U.N.I. - Paraguay

Tabla 2. Diámetros de inhibición obtenidos con el extracto hidroalcohólico de *M. chamomilla* L. (n=9)

Cepa	Diámetro en mm
<i>S. pneumoniae</i> 29212	10,50
<i>K. pneumoniae</i> 700603	6,50
<i>E. coli</i> 35218	9,75

<i>E. coli</i> 25922	8,75
<i>P. aeruginosa</i> 27558	8,30
<i>S. aureus</i> 25923	8,00
<i>S. aureus</i> 43300	6,00
<i>S. aureus</i> 29213	10,8
<i>C. parapsilosis</i> 22019	7,30

Fuente: Datos obtenidos en el Laboratorio de la Facultad de Medicina U.N.I. - Paraguay

Tabla 3. Comparación pareada de los diámetros de inhibición entre extracto acuoso e hidroalcohólico (n=9)

CEPA	E.A (*)	E.H. (*)
	Diámetro en mm	
<i>S. pneumoniae</i> 29212	13,66	10,5
<i>K. pneumoniae</i> 700603	7,25	6,50
<i>E. coli</i> 35218	20,5	9,75
<i>E. coli</i> 25922	19,16	8,75
<i>P. aeruginosa</i> 27558	12,83	8,30
<i>S. aureus</i> 25923	15	8,00
<i>S. aureus</i> 43300	7,75	6,00
<i>S. aureus</i> 29213	19	10,8
<i>C. parapsilosis</i> 22019	13,33	7,30

(*) E.A.: Extracto acuoso; E.H.: Extracto hidroalcohólico.

Fuente: Datos obtenidos en el Laboratorio de la Facultad de Medicina U.N.I

Tabla 4. Estadística descriptiva del halo inhibitorio de los extractos de *M. chamomilla* L. (n=9)

	Extracto Acuoso	Extracto Hidroalcohólico
Media	14,28	8,43
Mediana	13,66	8,30
Desviación estándar	4,75	1,68
Error estándar	1,58	0,56

Tabla 5. Resultado de la prueba T de Student para muestras pareadas

T de Student
T estadístico 4,87
Grado de libertad 8,00
p-valor 0,0012

La diferencia entre el halo producido por el extracto acuoso y el hidroalcohólico, es estadísticamente significativa, con una $p=0,001$

Discusión

En este estudio se evaluó la actividad inhibitoria *in vitro* de los extractos acuoso e hidroalcohólico de *M. chamomilla* L. sobre nueve cepas ATCC de bacterias y hongos. El extracto acuoso mostró halos de inhibición de hasta 21 mm en *E. coli*, 22 mm en *S. aureus*, mientras que el extracto hidroalcohólico presentó diámetros inhibitorios mucho menores en las mismas cepas.

La mayor potencia antibacteriana observada en el extracto acuoso sugiere que los compuestos fenólicos y

flavonoides solubles en agua podrían ser los principales responsables del efecto inhibitorio. Estos resultados apoyan la hipótesis de que la formulación acuosa facilita la liberación más eficiente de estos metabolitos.

Un estudio de 2021 sobre el extracto etanólico de manzanilla destacó efectos inhibitorios sobre cepas de *S. aureus* resistente a la meticilina (SARM) y *P. aeruginosa* multirresistente (MDR), aunque sin eficacia frente a todas las cepas MDR evaluadas (Ahani Azari & Danesh, 2021).

La eficacia del extracto acuoso frente a *Candida parapsilosis* coincide con reportes de actividad antifúngica de péptidos específicos de la planta que inducen estrés oxidativo de la membrana celular. En conjunto, estos hallazgos refuerzan y amplían la evidencia de la versatilidad antimicrobiana de *M. chamomilla*. (Müller & Wink, 2020).

Conclusión

Este estudio demuestra que el extracto acuoso de *Matricaria chamomilla* L. presenta una actividad inhibitoria significativamente superior al extracto hidroalcohólico en las nueve cepas ATCC evaluadas ($p = 0,0012$).

Estos hallazgos validan el potencial de la formulación acuosa como fuente de compuestos bioactivos con acción antimicrobiana y respaldan su uso

tradicional en fitoterapia.

Se recomienda avanzar hacia estudios in vivo, así como el aislamiento y caracterización química de los metabolitos responsables, para optimizar el desarrollo de futuros fitofármacos.

Referencias Bibliográficas

Qasem, A., Assagaf, H., Montesano, D., Khalil, Z., Al-Mijalli, S. H., Baaboua, A. E., et al. (2022). Determinación de compuestos químicos e investigación de las propiedades biológicas de los aceites esenciales de Matricaria chamomilla, miel y su mezcla. *Molecules*, 27,(9), 1234. Recuperado de <https://www.mdpi.com/1420-3049/27/9/1234>

Sah, A., Naseef, P. P., Kuruniyan, M. S., Jain, G. K., Zakir, F., & Aggarwal, G. (2022). Estudio exhaustivo de las aplicaciones terapéuticas de la manzanilla. *Pharmaceuticals*, 15,(10), 1284. Recuperado de <https://www.mdpi.com/1424-8247/15/10/1284>

Das, S., Horváth, B., Šafranko, S., Jokić, S., Széchenyi, A., & Kőszegi, T. (2019). Actividad antimicrobiana del aceite esencial de manzanilla: efecto de diferentes formulaciones. *Molecules*, 24,(23), 4321. Recuperado de

<https://www.mdpi.com/1420-3049/24/23/4321>

El Mihyaoui, A., Esteves da Silva, J. C. G., Charfi, S., Candela Castillo, M. E., Lamarti, A., & Arnao, M. B. (2022). Matricaria chamomilla L.: Revisión sobre usos etnomedicinales, fitoquímica y actividades farmacológicas. *Life*, 12,(4), 479. Recuperado de <https://www.mdpi.com/2075-1729/12/4/479>

Dai, Y. L., Li, Y., Wang, Q., Niu, F. J., Li, K. W., Wang, Y. Y., et al. (2022). La manzanilla: una revisión de sus usos tradicionales, componentes químicos, actividades farmacológicas y estudios de control de calidad. *Molecules*, 28, (1), 133. Recuperado de <https://www.mdpi.com/1420-3049/28/1/133>

Ahani Azari, A., & Danesh, A. (2021). Efecto antibacteriano del extracto alcohólico de Matricaria chamomilla contra aislados resistentes a fármacos de *Staphylococcus aureus* y *Pseudomonas aeruginosa*. *Infection Epidemiology and Microbiology*, 7,(1), 29–35.

Srivastava, J. K., Pandey, M., & Gupta, S. (2020). La manzanilla, la hierba milagrosa: una visión general. *Medicinal and Aromatic Plants*,

- 9,(2), 2167-0412. Recuperado de <https://www.omicsonline.org/open-access/chamomile-the-miracle-herb-an-overview-2167-0412-1000372.pdf>
- Müller, J., & Wink, M. (2020). Mecanismos moleculares de acción de extractos de plantas medicinales y aromáticas contra infecciones fúngicas invasivas. *Antibiotics*, 9,(5), 276. Recuperado de <https://www.mdpi.com/2079-6382/9/5/276>
- Jäger, W., & Biggs, J. S. (2021). Propiedades antibacterianas del extracto de manzanilla en combinación con terapia antibiótica. *BMC. Complementary Medicine and Therapies*, 21,(1), 1–10. Recuperado de <https://bmccomplementmedtherapies.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12906-021-03365-8>
- Ayoughi, F., Barzegar, M., Sahari, M. A., & Naghdibadi, H. (2011). Composición química de los aceites esenciales de manzanilla de tres regiones diferentes de Irán y sus propiedades antioxidantes. *Food Chemistry*, 129,(2), 391–397. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814611004297>
-

27.- Ciencia, tecnología e innovación

Software de propuesta de cimentaciones no superficiales basado en la resistencia del suelo obtenida del Standard Penetration Test (SPT) para la ciudad de Encarnación

Autor: Velázquez Rojas, María Marcela; marcela.velazquez@fiuni.edu.py

Universidad Nacional de Itapúa / Facultad de Ingeniería

Resumen

En respuesta a la escasa disponibilidad de herramientas tecnológicas aplicadas a la geotecnia en Paraguay, esta investigación desarrolló un software para la propuesta de cimentaciones no superficiales basadas en la resistencia del suelo obtenida mediante el Standard Penetration Test (SPT). El objetivo principal fue generar una herramienta que facilite el análisis preliminar para el diseño de cimentaciones profundas, considerando las condiciones geotécnicas específicas de la ciudad de Encarnación. La metodología adoptada incluyó una revisión bibliográfica especializada, la identificación de variables clave, el diseño e implementación de un algoritmo, y la validación del software utilizando datos reales de perforaciones realizadas en la ciudad. Como resultado, se obtuvo una herramienta eficaz y confiable, capaz de optimizar los tiempos de cálculo y mejorar la precisión de las recomendaciones preliminares para proyectos de cimentación. Esta propuesta busca contribuir al desarrollo de soluciones prácticas en la geotecnia local, promoviendo la utilización de herramientas computacionales en la ingeniería civil.

Palabras clave: Cimentaciones profundas, Standard Penetration Test, software geotécnico.

Introducción

El diseño de cimentaciones no superficiales constituye una parte esencial del proceso estructural, particularmente en regiones con condiciones geotécnicas variables como la ciudad de Encarnación, Paraguay. En estos contextos, el Standard Penetration Test (SPT) se posiciona como uno de los ensayos más utilizados para estimar la resistencia del suelo y su capacidad portante (Terzaghi & Peck, 1978; Bowles, 1996). No obstante, la interpretación tradicional de los resultados del SPT puede resultar compleja y demandar un análisis manual exhaustivo, lo que prolonga los plazos de trabajo y puede introducir incertidumbre en las decisiones técnicas (Skempton, 1986; Liao & Whitman, 1986).

A nivel regional, se identifica una limitada disponibilidad de herramientas tecnológicas específicas que integren datos geotécnicos con criterios de diseño aplicables, lo cual representa una barrera para la eficiencia del ejercicio profesional, especialmente en entornos donde los recursos técnicos son restringidos. En este marco, la presente investigación propone el desarrollo de un software modular orientado a generar propuestas preliminares de cimentaciones no superficiales a partir de variables clave obtenidas del SPT, tales como el número de golpes (N), la profundidad, el tipo de suelo y la presencia de napa freática.

La herramienta fue diseñada y validada con datos reales del subsuelo de Encarnación, lo que permitió verificar su aplicabilidad en condiciones locales. El sistema busca apoyar el trabajo del profesional geotécnico mediante la automatización de procesos, la mejora en la precisión del análisis inicial y la generación de recomendaciones ajustadas a parámetros reconocidos por la práctica internacional. De esta manera, se apunta a fortalecer la toma de decisiones técnicas que inciden directamente en la calidad y seguridad de las obras de infraestructura.

Objetivo General

Desarrollar un software que proponga cimentaciones no superficiales basado en la resistencia del suelo obtenida del Standard Penetration Test (SPT).

Objetivos Específicos

- Determinar las variables involucradas dentro de la determinación manual de una cimentación no superficial adecuada para distintos perfiles de suelo.
- Diseñar la estructura y la interfaz del software para garantizar la usabilidad y la eficiencia en la propuesta de cimentaciones no superficiales.
- Validar el rendimiento del software utilizando datos de SPT reales de la ciudad de Encarnación y comparar las propuestas de cimentaciones con las

recomendaciones de ingeniería geotécnica estándar.

Materiales y Métodos

Diseño de la investigación

Esta investigación se enmarca dentro del enfoque aplicado, orientado al desarrollo de una herramienta computacional que asista en la propuesta de cimentaciones no superficiales utilizando datos obtenidos mediante el Standard Penetration Test (SPT). La metodología adoptada integró varias fases: revisión bibliográfica especializada, identificación de variables clave, diseño e implementación de un algoritmo, desarrollo del software y su validación utilizando datos reales recolectados en la ciudad de Encarnación.

Para la implementación del algoritmo se seleccionó Python como lenguaje de programación, dada su versatilidad, eficiencia para el manejo de datos numéricos y amplia disponibilidad de bibliotecas científicas, lo que lo convierte en una de las herramientas más recomendadas en entornos académicos y de ingeniería aplicada (Lutz, 2013). Esta elección permitió estructurar un código legible y escalable, facilitando su validación y potencial mejora en futuras versiones.

Materiales y recursos empleados

1. Herramientas computacionales:
 - Lenguajes de programación:
 - Visual Basic: Utilizado inicialmente para la estructuración básica del programa y pruebas de funcionalidad.
 - Python: Incorporado posteriormente por su flexibilidad y capacidades en procesamiento de datos y generación de interfaces gráficas. Se utilizaron bibliotecas como NumPy, Pandas, Matplotlib, Tkinter y PyQt.
 - Entornos de desarrollo:
 - Microsoft Visual Studio: Para la codificación en Visual Basic.
 - PyCharm: Para la depuración avanzada y el desarrollo en Python.
 - Herramientas gráficas:
 - Tkinter y PyQt: Para el diseño de interfaces gráficas que facilitan la interacción usuario-software.
 - 2. Información geotécnica:
 - Datos del ensayo SPT recolectados previamente en estudios de suelos realizados en Encarnación.
 - Cartas geotécnicas de la zona, utilizadas como referencia técnica para verificar la validez de las propuestas del software.
 - 3. Normativas aplicadas:
 - NBR 6484:2001 (Norma Brasileña para ensayos de penetración estándar), que sirvió de base metodológica para interpretar los datos SPT y aplicar correcciones de campo pertinentes.

Procedimientos ejecutados

1. Revisión técnica y determinación de variables clave: se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva para identificar las variables geotécnicas esenciales que influyen en la elección de una cimentación no superficial: profundidad de cada estrato, número de golpes (N), clasificación visual del suelo, humedad relativa, presencia de napa freática y densidad aparente. Estas variables se establecieron como entradas fundamentales para el funcionamiento del software.

2. Diseño del algoritmo: se estructuró un algoritmo basado en ecuaciones empíricas reconocidas en la literatura geotécnica, considerando dos grandes grupos de suelo: cohesivos y granulares. A partir del valor corregido de N_{60} se implementaron fórmulas específicas para estimar la resistencia del suelo en cada caso, incluyendo ajustes cuando se presenta napa freática mediante el cálculo de esfuerzos efectivos. La lógica del algoritmo fue diseñada para ser independiente del tipo de estructura, enfocándose exclusivamente en el análisis del perfil de suelo.

3. Desarrollo del software: el sistema se organizó de manera modular para permitir su escalabilidad y adaptación futura. Se implementaron los siguientes módulos funcionales:

- Módulo de entrada de datos: Permite al usuario ingresar información

como profundidad, número de golpes (N), porcentaje retenido en tamiz #200, tipo de suelo, ubicación de la napa freática y peso unitario del suelo saturado.

- Módulo de procesamiento: Aplica las fórmulas seleccionadas para calcular la resistencia del suelo por estrato y sugiere la cimentación más adecuada según criterios básicos de capacidad de carga y profundidad.

- Módulo de salida de resultados: Genera informes por estrato que pueden visualizarse directamente o exportarse en formato .csv para ser utilizados en hojas de cálculo tipo Excel o generar gráficos comparativos.

4. Validación y control de calidad: se realizaron pruebas iterativas del software, utilizando tanto datos sintéticos como datos reales. Los resultados fueron comparados con recomendaciones obtenidas manualmente por profesionales del área geotécnica y con lo estipulado en cartas de referencia. Se incluyó un proceso de validación cruzada y se ajustaron aspectos del algoritmo según los resultados observados en los primeros ciclos de prueba. Además, se realizaron pruebas con presencia y ausencia de napa freática para verificar la consistencia de los cálculos.

Criterios de validez y control de calidad

1. Coherencia con normativas: Se comprobó que el tratamiento de los datos

SPT se ajustara a las recomendaciones de la NBR 6484:2001.

2. Validación técnica: Los resultados generados fueron evaluados por ingenieros geotécnicos para comprobar su razonabilidad respecto a casos prácticos reales.

3. Depuración iterativa: Durante el desarrollo se llevaron a cabo fases de prueba y depuración orientadas a eliminar errores en la interpretación de datos, cálculo de resistencia y visualización de resultados.

4. Flexibilidad del software: Se diseñó el sistema para que pueda ser utilizado con distintos perfiles de suelo y condiciones de campo, sin necesidad de ajustes manuales adicionales por parte del usuario.

Resultados y Discusión

Optimización en la propuesta de cimentaciones no superficiales

El software desarrollado demostró una notable eficiencia en la generación automatizada de propuestas de cimentaciones no superficiales. El análisis de cada caso se completó en un promedio de 3 segundos, lo que representa una mejora significativa respecto a los procesos manuales tradicionales, que suelen requerir tiempos de gabinete mucho mayores. Esta optimización repercutió positivamente en la productividad y en la agilidad de la toma de decisiones técnicas durante la etapa de diseño preliminar.

Precisión en la validación de datos

Durante el proceso de validación, se observó una coincidencia del 90 % entre las recomendaciones generadas por el software y las soluciones obtenidas mediante análisis manuales realizados por profesionales geotécnicos. Esta concordancia respalda la efectividad del algoritmo y su aplicabilidad a estudios preliminares.

Las diferencias detectadas en el 10 % restante estuvieron asociadas a la interpretación específica de las cargas estructurales y a ciertas condiciones particulares del terreno, que los profesionales consideraron de forma más detallada. Esto refuerza la necesidad de complementar los resultados del software con estudios estructurales más específicos cuando se requiera mayor precisión.

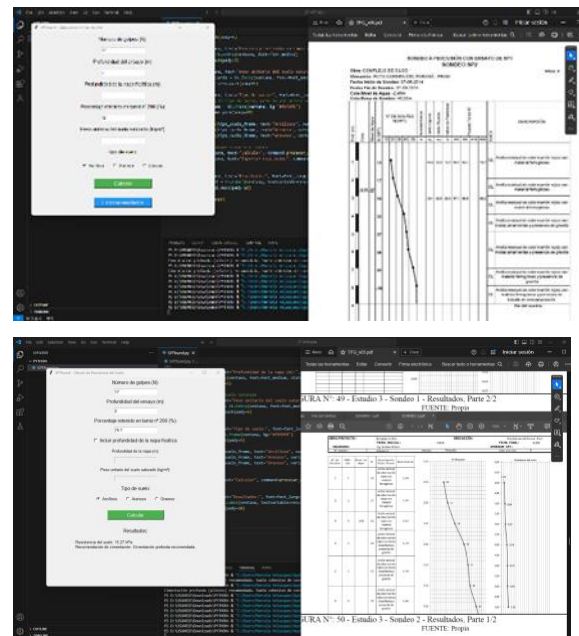


Figura 1 y 2. Ejemplo de resultados de validación: comparación entre propuesta manual y recomendación automatizada.

Resultados por tipo de suelo

En los casos evaluados, predominan perfiles arcillosos con altos niveles de humedad, característicos del área de Encarnación. El software respondió de manera coherente, recomendando cimentaciones profundas en todos estos casos, debido a la reducción en la resistencia al corte no drenado, lo que coincide con lo planteado por Skempton (1986). Esta respuesta automatizada valida el comportamiento esperado del sistema ante suelos cohesivos blandos.

En cuanto a suelos arenosos o granulares, si bien no fueron identificados en los ensayos realizados, el algoritmo contempla recomendaciones teóricas basadas en los parámetros propuestos por Bowles (1996), lo que permite considerar una posible aplicación futura en otras regiones con características diferentes.

Exportación y compatibilidad

El sistema permite la exportación de los resultados en formato .csv, lo cual facilita su integración con herramientas complementarias como Microsoft Excel u hojas de cálculo similares. Esta funcionalidad es especialmente útil tanto para análisis adicionales como para la generación de informes técnicos formales.

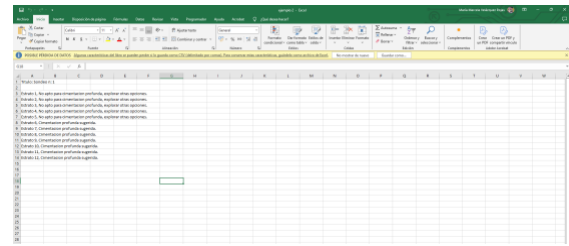


Figura 3. Ejemplo de archivo exportado con recomendaciones por tipo de suelo.

Comparación con investigaciones previas

• Coincidencias:

El análisis en suelos arcillosos validó el enfoque teórico de Das (2010), quien destaca el rol de la cohesión y la sensibilidad a la humedad en la capacidad portante del terreno. Además, los resultados se mantienen en línea con estudios anteriores en la región (Velázquez, 2021), en los que también se observaron tendencias similares en el comportamiento de resistencia en función del número de golpes SPT.

• Diferencias:

A diferencia de los métodos manuales tradicionales descritos por Velázquez (2021), que requieren un tratamiento individual y extenso por parte del profesional, este desarrollo automatiza el proceso, reduciendo la intervención humana y los márgenes de error subjetivo. Esto representa un avance metodológico en términos de uniformidad y eficiencia.

Contribuciones del software al campo de la geotecnia

Este trabajo representa una innovación en la automatización del diseño

preliminar de cimentaciones no superficiales, con un enfoque adaptado a las condiciones geotécnicas específicas del sur del país. Al ofrecer una interfaz orientada al usuario, el sistema es accesible incluso para profesionales con experiencia limitada en herramientas de análisis computacional, lo que facilita su incorporación en proyectos reales.

Limitaciones identificadas

El análisis realizado reveló ciertas restricciones en el sistema actual:

- El software depende exclusivamente de los datos obtenidos mediante ensayos SPT, sin incluir variables estructurales clave como el tamaño de la cimentación o los esfuerzos transferidos por la estructura.
- No contempla aún cimentaciones mixtas o intermedias, lo que limita su alcance a soluciones puramente profundas.

Estas limitaciones no afectan su aplicación como herramienta de evaluación preliminar, pero sí marcan un horizonte claro para futuras mejoras.

Relación con el contexto local

Los datos recolectados en Encarnación muestran una clara predominancia de suelos cohesivos con alta humedad, lo que justifica la decisión de orientar el desarrollo hacia este tipo de materiales. Esta adaptación local le otorga una ventaja inmediata en la región de Itapúa. A su vez, el algoritmo puede

ajustarse con facilidad a otras zonas del país, incorporando nuevos perfiles geotécnicos y valores regionales del SPT, ampliando así su campo de aplicación.

Conclusiones

El software desarrollado evidencia cómo la incorporación de herramientas tecnológicas puede optimizar con solidez los procesos preliminares de diseño en geotecnia, aportando mayor precisión, velocidad de respuesta y trazabilidad a partir de datos derivados del ensayo SPT. El tiempo promedio de cálculo, de solo 3 segundos por caso, junto con una coincidencia del 90 % respecto a análisis manuales realizados por expertos, confirma su viabilidad operativa en contextos reales, especialmente en zonas con predominancia de suelos arcillosos como Encarnación.

Además de minimizar errores humanos, este tipo de soluciones informatizadas facilita la interpretación técnica por parte de profesionales que, si bien no cuentan con formación avanzada en programación o análisis numérico, pueden aprovechar los resultados para una toma de decisiones más fundamentada. A esto se suma la posibilidad de exportar resultados y compartir informes en formatos compatibles, lo que promueve la colaboración interdisciplinaria y el trabajo conjunto en etapas de diseño.

Sin embargo, su dependencia exclusiva del SPT deja abierta la necesidad de incorporar variables estructurales más específicas y de ampliar su campo de aplicación hacia suelos granulares o condiciones mixtas, lo que abre una línea clara de trabajo para el futuro. Este carácter modular del software permite, justamente, su actualización progresiva y adaptación a otros escenarios técnicos del país.

En un contexto donde la ingeniería se encuentra cada vez más comprometida con su entorno y sus necesidades concretas, esta herramienta representa una respuesta local e innovadora a una problemática recurrente en gabinete: la falta de tiempo y recursos para realizar estudios detallados en etapas tempranas de obra. Así, el trabajo se alinea con los principios de transformación tecnológica con impacto territorial, proponiendo soluciones que no solo optimizan recursos, sino que pueden ser replicadas, mejoradas y adaptadas según nuevas demandas.

Más que una solución cerrada, este desarrollo constituye una plataforma sobre la cual seguir construyendo tecnología nacional aplicada a la ingeniería, con la mirada puesta en una práctica profesional más eficiente, colaborativa y adaptada al entorno.

Referencias Bibliográficas

- Aguirre De La Cruz, E. C., & Tasayco Falcón, E. L. (2024). *Análisis de diseño de micropilotes a través de pruebas de carga en suelos de baja resistencia con estratos de arenas potencialmente licuefactibles de cercos perimétricos en Chimbote* [Trabajo de investigación de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. Recuperado de <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/674260>
- Asociación Paraguaya de Carreteras. (2019). *Método de penetración normal y muestreo con tubo partido de los suelos. Manual de carreteras del Paraguay: Ensayos de materiales para construcción de carreteras – Unidad 6*. Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (MOPC).
- Bass, L., Clements, P., & Kazman, R. (2012). *Software architecture in practice* (3a ed.). Addison-Wesley.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation analysis and design*. McGraw-Hill.
- Cifuentes, C. A. (2008). *Guía práctica para el cálculo de capacidad de carga en cimentaciones superficiales, losas de cimentación, pilotes y pilas* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3004_C.pdf

- Das, B. M. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (2a ed.). International Thomson Editores.
- Das, B. M. (2010). *Principles of foundation engineering* (7a ed.). Cengage Learning.
- Das, B. M. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (4a ed.). Cengage Learning Editores S.A.
- Electric Power Research Institute. (1990). *Manual on estimating soil properties for foundation design* (EPRI Report No. EL-6800). Palo Alto, CA: EPRI. Recuperado de https://www.geoengineer.org/storage/publication/20489/publication_file/2745/EL-6800.pdf
- Ferreira, M. (2012). *Carta geotécnica del microcentro urbano de la ciudad de Encarnación* [Trabajo de titulación, Universidad Nacional de Itapúa, Facultad de Ingeniería].
- Fowler, M. (2003). *Patterns of enterprise application architecture*. Addison-Wesley.
- GeoLogismiki. (s.f.). *About us*. Recuperado de <https://geologismiki.gr/about-us/>
- Geotechnical & Geoenvironmental Software Directory. (s.f.). Recuperado de <http://www.ggsd.com/>
- IEEE. (2000). *IEEE recommended practice for architectural description of software-intensive systems* (IEEE Std 1471-2000). IEEE.
- ISO/IEC. (2011). *ISO/IEC 25010:2011 Systems and software engineering—Systems and software quality requirements and evaluation (SQuaRE): System and software quality models*. Canadian Standards Association.
- Jiménez Salas, J. A., & De Justo Alpañes, J. L. (1975). *Geotecnia y cimientos I* (2a ed.). Editorial RUEDA.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1976). *Mecánica de suelos*. Editorial LIMUSA S.A.
- Liao, S. S. C., & Whitman, R. V. (1986). Overburden correction factors for SPT in sand. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 112(3), 373–377.
- Lutz, M. (2013). *Learning Python* (5a ed.). O'Reilly Media.
- Mapa de los suelos del Paraguay. (s.f.). Recuperado de <https://www.geologiadelparaguay.com.py/mapasdesuelos.htm>
- Mapa geológico del Paraguay. (2014). Recuperado de https://www.ssme.gov.py/vmme/images/mi-neria/mapa%20geologico_1million_set2014.png
- Mondragón Zurita, A. O. (2022). *Estimación de la capacidad portante de un suelo cohesivo a través del ensayo SPT, elementos finitos y métodos analíticos de Terzaghi y Meyerhof* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca]. Cajamarca, Perú.
- Murray, H. H. (2007). *Applied clay mineralogy*. Elsevier B.V.
- NBR 6484:2001. (2001). *Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Reinert, H. O., Ayala, A. R., & Mazal, O. (s.f.). *Correspondencia entre ensayo SPT y capacidad de carga de suelos tropicales de Misiones, Argentina*. Relat6rio t6cnico-cient6fico presentado en la XXI Jornada de Pesquisa, Facultad de Ingenier6a, Universidad Nacional de Misiones, Argentina.

Robertson, P. K., & Campanella, R. G. (1983). Interpretation of cone penetration tests (CPT)—Part I: Sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 20(4), 718–733.

Rodr6guez Bucarely, C. M. (2008). *Visual Basic 6.0, orientado a bases de datos* (2a ed.). Desarrollando Grupo Experto Bucarely.

Skempton, A. W. (1986). Standard penetration test procedures and the effects in sands. *Geotechnique*, 36(3), 425–447.

Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. John Wiley & Sons, Inc.

Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1978). *Mec6nica de suelos en la ingenier6a pr6ctica* (3a ed.). Editorial El Ateneo.

Vel6zquez, M. M. (2021). *Software para la obtenci6n de la resistencia del suelo basado en los datos proporcionados por el Standard Penetration Test (SPT)* [Trabajo de titulaci6n, Universidad Nacional de Itap6a].

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Itap6a, por seguir apostando al impulso de investigaciones aplicadas con impacto en

el entorno profesional y social. A la Direcci6n de Investigaci6n y Ambiente, por brindar el respaldo necesario para el desarrollo de este trabajo, y a la Facultad de Ingenier6a, por su constante compromiso con la formaci6n integral y la promoci6n de proyectos que vinculan ciencia, tecnolog6a e ingenier6a.

Adem6s, agradezco profundamente a mis padres, Mar6a Teresa Rojas y Heriberto Vel6zquez V6zquez, y a mi pareja, Marcos Antonio Rodr6guez Garay, por ser, los tres, un sost6n constante a lo largo de este proceso, brind6ndome su apoyo, aliento, confianza y acompa1amiento incondicional en cada desaf6o que emprendo.

Financiamiento

Este proyecto fue desarrollado en el marco del concurso “Profesores Investigadores de la Universidad Nacional de Itap6a” del a1o 2024, conforme al reglamento de postulaci6n establecido por la Direcci6n de Investigaci6n y Ambiente de la Universidad Nacional de Itap6a. El apoyo institucional y econ6mico brindado en esta convocatoria permiti6 la ejecuci6n integral de la investigaci6n.

31. Tecnologías de la información y comunicación

Patrones de comportamiento entre condiciones climáticas y la producción de soja en el Departamento Alto Paraná

Autora: Cáceres Cañete, Shyrley Carolina; shyrleycaceres@fpune.edu.py

Orientadora: Ayala Díaz, Katia Andrea; ktiaayala@gmail.com

Universidad Nacional del Este / Facultad Politécnica

Resumen

El objetivo de este trabajo fue identificar patrones de comportamiento entre las condiciones climáticas y la producción de soja en el Departamento Alto Paraná, Paraguay, durante el período 2010–2020, aplicando técnicas de minería de datos. Se utilizaron 2.335 registros históricos con variables meteorológicas (precipitación, temperaturas mínima, media y máxima, humedad relativa, presión atmosférica, viento, nubosidad y evapotranspiración) y productivas (toneladas de soja), obtenidos de fuentes oficiales de Paraguay. Se aplicaron técnicas de limpieza, normalización y la prueba de Shapiro-Wilk para evaluar la distribución de los datos. En la fase de minería de datos se entrenaron Random Forest, XGBoost y un modelo híbrido con Regresión Logística, usando partición de datos y SMOTE para balancear clases. La evaluación se realizó mediante métricas de desempeño (precisión, recall, F1-score, AUC) y la librería SHAP para interpretar la influencia de cada variable. Los resultados mostraron un 80 % de precisión con Random Forest y 90 % con el modelo híbrido. Las variables más influyentes fueron evapotranspiración, humedad relativa y temperatura media. Se concluyó que la minería de datos permite identificar patrones climáticos que explican la variabilidad de la producción y aportan insumos prácticos para sistemas de alerta temprana, planificación agrícola sostenible y políticas adaptativas en la región.

Palabras claves: minería de datos, clima, soja, análisis de datos.

Introducción

La producción de soja constituye una de las actividades económicas más relevantes para el Paraguay, ya que representa uno de los principales rubros de exportación y aporta significativamente al producto interno bruto agrícola. Según datos recientes, el país se ubica en el puesto nro. 6 como productor mundial y nro. 3 como exportador de soja, con una producción estimada de 10.100.000 toneladas distribuidas en aproximadamente 3.650.000 hectáreas de siembra (Green Commodities Paraguay, 2024; ABC Color, 2024). En este contexto, el Departamento Alto Paraná concentra alrededor del 30 % del total cultivado, consolidándose como una de las regiones de mayor importancia productiva. No obstante, la variabilidad climática impacta de manera significativa en los rendimientos agrícolas, generando incertidumbre en la planificación productiva y amenazando la estabilidad económica del sector. Estudios internacionales han evidenciado que el cambio climático modifica de forma directa variables como temperatura, precipitación y disponibilidad hídrica, con efectos sobre la fisiología de los cultivos y su productividad (Vergara et al., 2014; Science News, 2024). En Paraguay, este fenómeno adquiere especial relevancia, pues las condiciones climáticas adversas afectan tanto a grandes productores como a pequeños agricultores con menor capacidad de adaptación tecnológica.

El problema de investigación radica en la ausencia de estudios que integren datos climáticos y productivos para explicar cómo factores como evapotranspiración, humedad relativa, temperatura, presión atmosférica, viento y precipitación; condicionan los niveles de producción de soja en Alto Paraná. Si bien hay investigaciones relacionadas con la producción agrícola y el clima en América Latina, aún se carece de evidencia empírica específica para esta región, que posibilite establecer patrones confiables de comportamiento. La importancia del presente trabajo se fundamenta en que en él se propone un enfoque innovador a través de la minería de datos, entendida como el proceso de descubrimiento de patrones significativos en grandes volúmenes de información. Este tipo de análisis posibilita superar las limitaciones de los métodos tradicionales, al combinar algoritmos de clasificación, técnicas de balanceo de datos e interpretabilidad de modelos, con el fin de extraer conocimiento útil para el sector agrícola (Ferri Ramírez, Ramírez Quintana & Hernández Orallo, 2004). En este sentido, la investigación fortalece la toma de decisiones de productores, cooperativas y responsables de políticas públicas, contribuyendo al diseño de estrategias de adaptación frente a los efectos del cambio climático. El trabajo se delimita espacialmente al Departamento Alto Paraná, dada su importancia estratégica en

la producción nacional de soja (Cámara Paraguaya de Exportadores y Comercializadores de Cereales y Oleaginosas [CAPECO], 2024); y temporalmente al intervalo de los años 2010 a 2020, lo cual posibilita analizar una década de datos históricos que reflejan tendencias y variaciones climáticas relevantes. Asimismo, el trabajo se delimita temáticamente a la producción de soja, por ser el cultivo de mayor peso socioeconómico en la región.

Bajo estas delimitaciones, se busca identificar patrones de comportamiento entre las variables climáticas y los niveles de producción, proporcionando una base empírica para el desarrollo de sistemas de alerta temprana, planificación agrícola sostenible y formulación de políticas públicas adaptativas en Paraguay.

Objetivos

Objetivo general.

Identificar patrones de comportamiento entre las condiciones climáticas y la producción de soja en el Departamento Alto Paraná, Paraguay, durante el período 2010–2020; utilizando técnicas de minería de datos.

Objetivos específicos.

1. Obtener datos históricos sobre la producción de soja en función de las variables climáticas relevantes.
2. Preprocesar los datos a través de procesos de limpieza, transformación y escalado de datos.

3. Explorar patrones de comportamiento productivo en los cultivos de soja considerados, a través de la implementación de algoritmos de minería de datos descriptivos y predictivos.
4. Interpretar los resultados con base en métricas y herramientas explicativas adecuadas.

Materiales y Métodos

El trabajo posee enfoque cuantitativo, se enmarca en un diseño no experimental, su nivel es explicativo-predictivo y de alcance temporal longitudinal, dado que se analizan datos históricos de producción de soja y variables climáticas correspondientes a períodos anuales en el intervalo entre los años 2010 y 2020, en el Departamento Alto Paraná, Paraguay.

Datos y muestra: Se utilizó un conjunto de 2.335 registros recopilados a partir de fuentes oficiales del Ministerio de Agricultura y Ganadería (Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG], 2025) y de la Dirección Nacional de Meteorología e Hidrología (Dirección de Meteorología e Hidrología [DMH], 2025).

Las variables independientes incluyen precipitación, temperaturas mínima, media y máxima, humedad relativa, presión atmosférica, viento, cobertura nubosa y evapotranspiración, mientras que la variable dependiente corresponde a la producción anual de soja expresada en toneladas.

Procedimiento: El trabajo discurrió según el proceso de descubrimiento de conocimiento en bases de datos (KDD), estructurado en cuatro fases (Coria, 2013):

1. Integración y preparación de datos: unificación de fuentes, eliminación de

duplicados y registros incompletos, y normalización de variables mediante MinMaxScaler.

2. Análisis exploratorio: caracterización de las variables mediante estadística descriptiva, prueba de Shapiro-Wilk para evaluar normalidad y detección de valores atípicos. En la tabla 1 que sigue, en la primera columna se listan los campos de registros del *dataset* de producción de soja, en la segunda columna se brinda una breve descripción del significado de cada uno de los campos.

Tabla 1

Descripción de las variables empleadas en el análisis

Columna	Descripción
PERIODO	Enumeración ordenada por año de cosecha
ANHO_AGRICOLA	Año de cosecha
PRODUCCION	Toneladas de soja
ANHO	Año
MES	Mes
DIA	Día
TEMP_MED	Temperatura media diaria expresada en °C
HUMEDAD	Humedad relativa media diaria expresada en porcentaje (%)
PRECIPITACION	Precipitación diaria expresada en milímetros (litros por metro cuadrado)
TEMP_MAX	Temperatura máxima diaria expresada en °C
TEMP_MIN	Temperatura mínima diaria expresada en °C
HELADA_AGRO	Helada agronómica (temperatura ≤ 2 °C): 1→sí; 0→no.
HELADA_MET	Helada meteorológica (temperatura ≤ 0 °C): 1→sí; 0→no.
PRESION_ATM	Presión atmosférica diaria a nivel medio del mar, expresada en hPa
COBERTURA_NUB	Cobertura nubosa media diaria expresada en octas
VIENTO	Velocidad del viento expresado en km/h
EVAPO_TRANS	Evapotranspiración mensual expresada en milímetros (litros por metro cuadrado)

Fuente: elaboración propia a partir del dataset (DMH, 2025; MAG, 2025)

3. Minería de datos: En esta fase se entrenaron y evaluaron diversos modelos de clasificación con el fin de identificar patrones climáticos asociados a la producción de soja. Se implementaron los modelos Random Forest, XGBoost y un modelo híbrido ensamblado mediante Regresión Logística. Dado que la variable objetivo (producción de soja discretizada en clases baja, media y alta) presentó un desbalance entre categorías, se aplicó

la técnica SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique) para generar observaciones sintéticas de las clases minoritarias. Esta estrategia equilibra el conjunto de datos y mejora la capacidad de generalización de los modelos. El procedimiento fue implementado en el lenguaje Python mediante la librería imblearn, utilizando un `random_state=42` para asegurar la reproducibilidad de los resultados (Figura 1).

```
# Balanceo de clases
smote = SMOTE(random_state=42)
X_res, y_res = smote.fit_resample(X, y)

# División de datos
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
    X_res, y_res, test_size=0.3, random_state=42
)
```

Figura 1

Balanceo de clases de la variable objetivo mediante SMOTE.

Posteriormente, los datos fueron divididos entre entrenamiento (70 %) y prueba (30 %). En el caso de Random Forest, se realizó un proceso de optimización de hiperparámetros mediante GridSearchCV (Figura 2). Los parámetros ajustados incluyen:

- `n_estimators`: número de árboles en el bosque. Se evaluaron diferentes configuraciones, seleccionándose 200

árboles como el punto de mejor equilibrio entre rendimiento y costo computacional.

- `max_depth`: profundidad máxima de los árboles. Se fijó en 20, lo cual permitió capturar interacciones complejas entre variables sin llegar a un sobreajuste.
- `min_samples_leaf`: número mínimo de muestras por hoja. Se configuró en 1 para posibilitar divisiones finas en los nodos terminales.

- `min_samples_split`: número mínimo de muestras necesarias para dividir un nodo. Se fijó en 2, lo cual permitió explorar con el modelo, todas las posibles particiones válidas.

Estos parámetros fueron estimados mediante experimentación y validación

crucada, buscando maximizar la métrica de precisión en el conjunto de prueba. Con el modelo optimizado se alcanzó un rendimiento de 80 %, confirmando la solidez del algoritmo para clasificar escenarios climáticos asociados a la producción de soja.

```
rf = RandomForestClassifier(random_state=42, class_weight='balanced')
grid_search = GridSearchCV(
    estimator=rf,
    param_grid=param_grid,
    cv=5,
    scoring='f1_weighted',
    n_jobs=-1,
    verbose=1
)

print("\n Optimizando hiperparámetros...")
grid_search.fit(X_train, y_train)

# Mejor modelo
best_rf = grid_search.best_estimator_
print(f"\n Mejores parámetros: {grid_search.best_params_}")
```

Figura 2

Proceso de búsqueda y ajuste de hiperparámetros de Random Forest.

En el diagrama de flujo de la Figura 3 se resume el proceso seguido para la implementación de modelos de clasificación. Este inició con la carga y selección de datos climáticos y productivos, la división en conjuntos de entrenamiento y prueba, la normalización de variables mediante `MinMaxScaler` y el balanceo de clases con `SMOTE`. Posteriormente, se entrenaron los modelos

base Random Forest y XGBoost, cuyos resultados se integraron en un meta-modelo de Regresión Logística a través de `StackingClassifier`. Finalmente, se evaluó el desempeño con métricas de clasificación (accuracy, precisión, recall, F1-score) y se lo complementó con técnicas de interpretabilidad que permitieron identificar las variables más influyentes en la producción de soja.

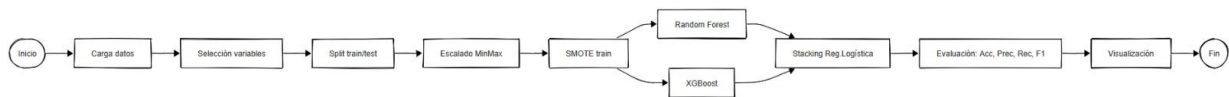


Figura 3

Flujo de implementación de modelos de clasificación. Elaboración propia

Modelo 1: Random Forest: fue implementado con los siguientes pasos:

- Selección de variables: se incluyeron 11 variables climáticas como variables características, se definió la producción como variable objetivo.
- División de datos: se realizó un particionamiento en conjuntos de entrenamiento: 70% y prueba en una proporción 30%.
- Configuración del modelo: se optimizaron los hiperparámetros obteniéndose los siguientes valores: {'max_depth':20,

'min_samples_leaf':1,
'min_samples_split':2,
'n_estimators': 200}.

- Evaluación: se alcanzó un 80 % de precisión con el modelo, en el conjunto de prueba.
- Interpretabilidad: se visualizó la importancia de las variables mediante un gráfico de barras, lo cual permitió identificar aquellas que tienen mayor peso en el modelo. También se mostró un árbol de decisión individual del modelo para interpretar cómo se toman las decisiones

Mejores parámetros: {'max_depth': 20, 'min_samples_leaf': 1, 'min_samples_split': 2, 'n_estimators': 200}

Resultados en entrenamiento: Mejor F1 Score = 0.781

Evaluación en conjunto de prueba:

Métricas de Evaluación:				
	precision	recall	f1-score	support
Baja	0.79	0.83	0.81	234
Media	0.80	0.73	0.76	265
Alta	0.80	0.82	0.81	266
accuracy			0.79	765
macro avg	0.79	0.79	0.79	765
weighted avg	0.79	0.79	0.79	765

Figura 4

Métricas de evaluación del modelo Random Forest en el conjunto de prueba.

En el diagrama de la Figura 5 muestra un flujo orientado a la optimización y evaluación de los modelos. El proceso inició con la carga y preprocesamiento de datos, seguido de la división en entrenamiento y prueba. Se aplicó escalado en el conjunto de entrenamiento y posteriormente en prueba, además de SMOTE para balancear las clases. La búsqueda de hiperparámetros fue realizada mediante la técnica GridSearchCV, integrando en un *pipeline* el

escalado, el balanceo y el modelo. Con los mejores parámetros obtenidos, se ha entrenado el clasificador y se ha evaluado su desempeño utilizando métricas como accuracy, precisión, recall, F1-score, ROC/AUC, Balanced Accuracy, Kappa y matriz de confusión. Finalmente, se generaron interpretaciones a partir de la importancia de variables y gráficos de árbol, lo cual explica la lógica de decisión del modelo.

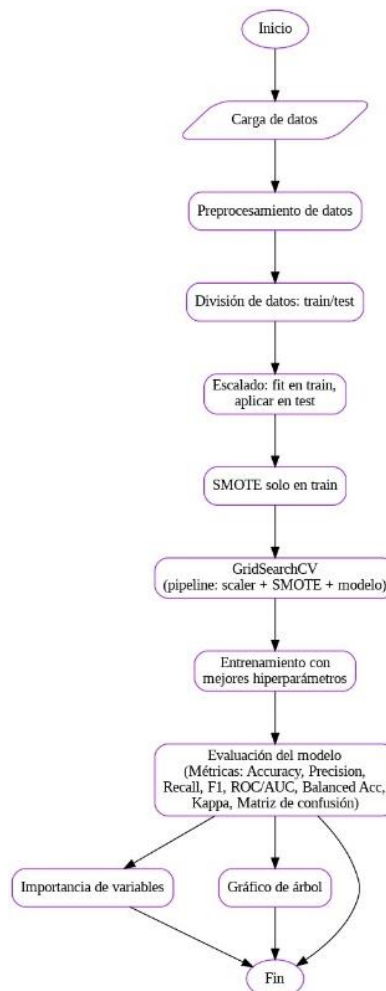


Figura 5

Diagrama de optimización y evaluación de modelos de clasificación. Elaboración propia

Modelo 2: Modelo Híbrido (Random Forest + XGBoost con ensamblado por Regresión Logística). Con el fin de robustecer el análisis, se ha diseñado un modelo híbrido de ensamblado con los siguientes pasos:

- Se entrenaron de forma independiente, un modelo Random Forest y un modelo XGBoost sobre el mismo conjunto de datos, utilizando 80 % para entrenamiento y 20 % para prueba.
- Para mejorar el equilibrio de clases, se ha aplicado la técnica SMOTE exclusivamente en el conjunto de entrenamiento.
- Las variables predictoras fueron normalizadas con la función MinMaxScaler, para garantizar un rango uniforme de entrada en todos los clasificadores.
- Los modelos base fueron ensamblado mediante la técnica StackingClassifier, empleando Regresión Logística como meta-modelo, lo cual permitió consolidar los resultados individuales en una única predicción.
- El desempeño final fue evaluado mediante métricas *accuracy*, *precisión*, *recall* y F1-score, alcanzando una precisión del 90 %, lo cual evidencia una mayor robustez en comparación con los modelos individuales.

4. Evaluación e interpretación: el desempeño de los modelos fue medido con métricas *precisión*, *recall*, F1-score y AUC. La interpretabilidad fue abordada mediante valores SHAP, que posibilitaron estimar la importancia relativa de las variables en la predicción.

La elección de algoritmos de aprendizaje automático responde al objetivo de identificar patrones climáticos asociados al rendimiento agrícola. La combinación de modelos de clasificación con técnicas de interpretabilidad asegura robustez en los resultados y aporta evidencia práctica para la planificación agrícola y el diseño de estrategias adaptativas frente al cambio climático.

Resultados y Discusión

Los modelos implementados confirman la hipótesis formulada al principio del trabajo, referente a que mediante el modelo híbrido compuesto por la combinación de los algoritmos Random Forest y XGBoost ensamblados con regresión logística; es posible detectar patrones significativos de producción de soja en el Departamento Alto Paraná, con grado de precisión de al menos 60 %; en función de las variables de condición climática: temperatura media, humedad, precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima,

presión atmosférica, cobertura nubosa, viento y evapotranspiración.

La evapotranspiración fue identificada como la variable más influyente, seguida por la humedad relativa y el viento, lo cual evidencia la relevancia de los factores hídricos y atmosféricos en el rendimiento agrícola. El análisis fue realizado sobre un conjunto de 2.335 registros climáticos y productivos correspondientes al Departamento Alto Paraná, entre los años 2010 y 2020. La variable objetivo fue la

producción de soja, discretizada en tres categorías: baja, media y alta. El conjunto inicial presentó un desbalance entre clases, que fue corregido aplicando la técnica SMOTE para equilibrar los datos. Las variables predictoras incluyeron evapotranspiración, humedad relativa, temperaturas mínima, máxima y media, precipitación, presión atmosférica, cobertura nubosa, viento y heladas agrícolas y meteorológicas (Fig. 6).

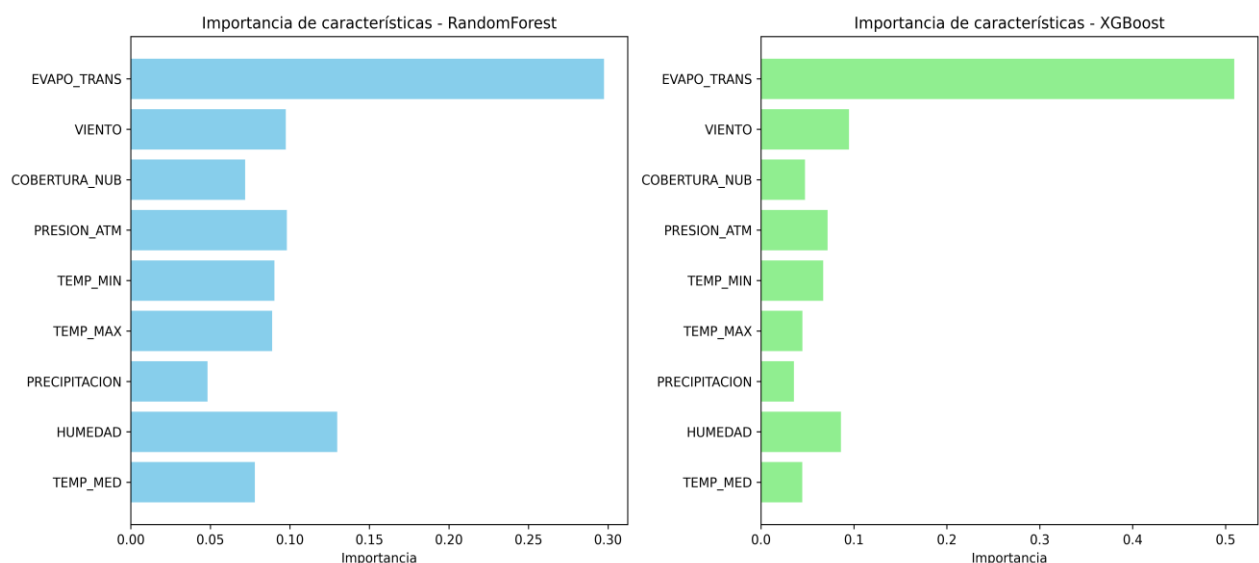


Figura 6

Importancia de variables – Modelo híbrido

El análisis de importancia de variables mostró que la producción de soja está fuertemente condicionada por la dinámica hídrica y térmica.

- La baja producción se asocia con temperaturas extremadamente bajas y valores reducidos de evapotranspiración, reflejando un entorno frío y con escasa pérdida

de agua, desfavorable para el desarrollo vegetativo.

- La alta producción ocurre en escenarios con temperaturas medias a altas, alta humedad relativa y elevada evapotranspiración, condiciones que promueven la fotosíntesis y la transpiración, favoreciendo el crecimiento óptimo del cultivo.
- La producción intermedia se corresponde con condiciones moderadas de temperatura, humedad y evapotranspiración, que posibilitan un desarrollo aceptable aunque limitado por factores parciales.

Aplicando el árbol de decisión (Fig. 7) se ha confirmado que la evapotranspiración es la variable clave en la clasificación, con un umbral de 73,03 mm en el nodo raíz. La baja producción se observa con temperaturas medias $\leq 19,14$ °C o humedades $\leq 64,60$ %. La producción intermedia aparece con temperaturas mínimas bajas, evapotranspiración en torno a 139,69 mm o humedad relativa cercana al 87,98 %. La alta producción se asocia con evapotranspiración $\geq 154,58$ mm y humedad elevada (87–88 %), acompañadas de presión atmosférica estable (~ 1015 hPa) y baja nubosidad ($\leq 0,30$ octas).

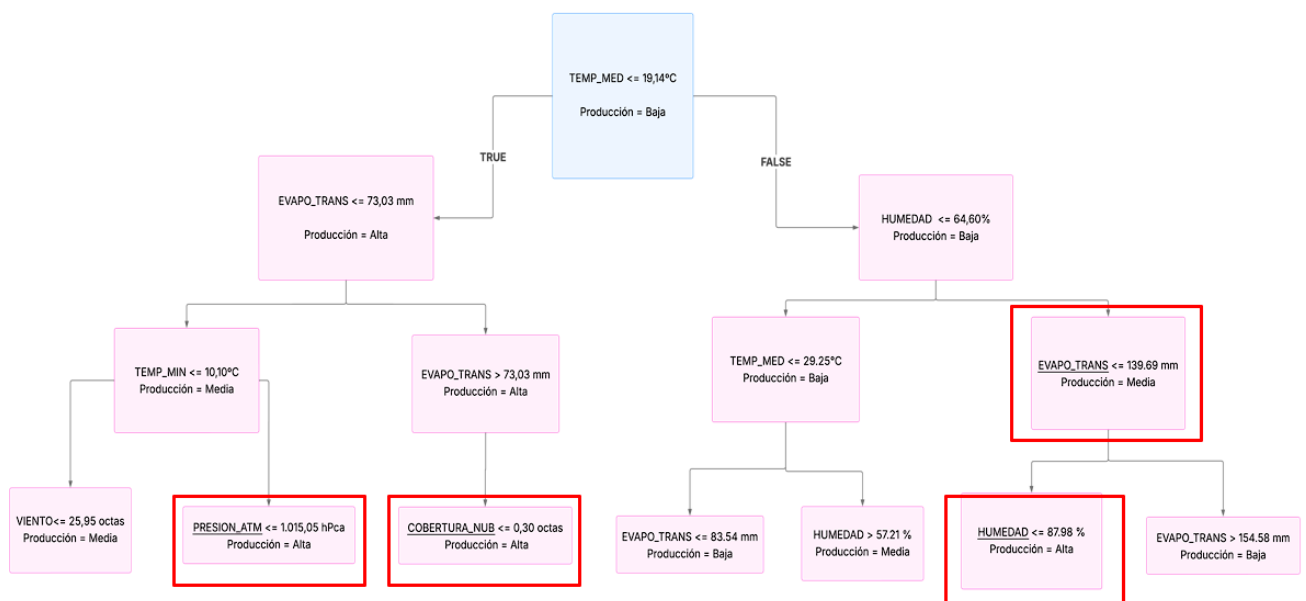


Figura 7

Árbol de decisión representativo del modelo Random Forest.

Mediante el análisis con valores SHAP se ratificó que la evapotranspiración y la humedad relativa son los predictores más influyentes, seguidos por la presión atmosférica y el viento. Las variables de temperatura y precipitación tienen un papel secundario pero complementario. Este patrón confirma la existencia de una

relación no lineal y multivariable, donde combinaciones específicas de condiciones hídricas y atmosféricas determinan los niveles de producción. Estos resultados constituyen una base para sistemas de alerta temprana y para la planificación agrícola adaptativa.

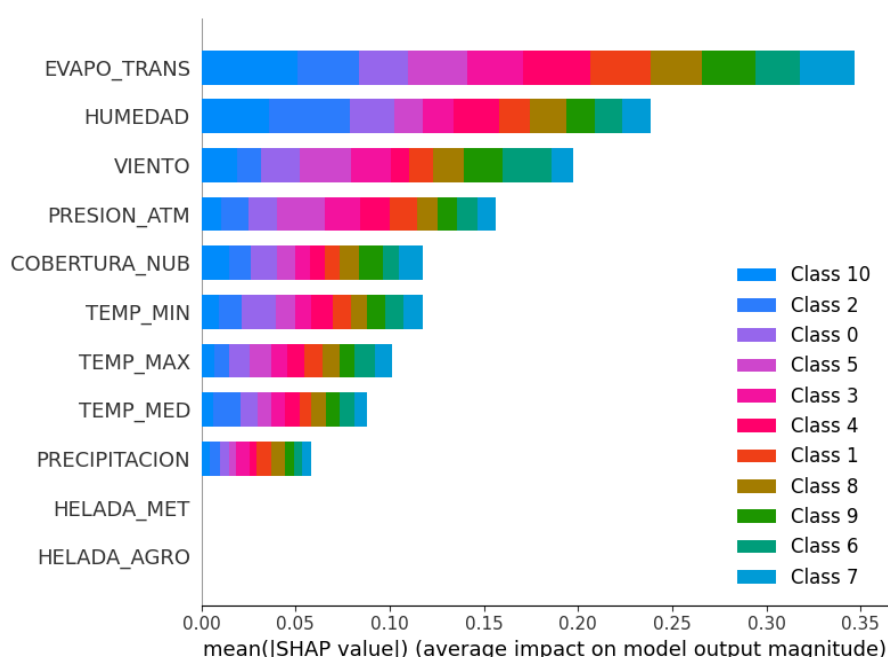


Figura 8

Importancia de variables en el modelo híbrido según valores SHAP. Elaboración propia.

Conclusiones

Se ha logrado demostrar la utilidad de la minería de datos como herramienta para identificar patrones en la relación entre clima y producción de soja, validando su potencial como apoyo a la agricultura sostenible y a la toma de decisiones basadas en evidencia. La evapotranspiración fue confirmada como la

variable más determinante, al reflejar la disponibilidad hídrica y su incidencia directa en el crecimiento del cultivo, seguida por la humedad relativa y el viento, que influyen en procesos fisiológicos y en el estrés mecánico de la planta. La temperatura media a alta se asocia con condiciones favorables para el rendimiento, siempre que se combine con

adecuada disponibilidad hídrica, mientras que los extremos de temperatura posibilitan detectar escenarios de riesgo vinculados con heladas o estrés térmico. Variables complementarias como la presión atmosférica, la cobertura nubosa y la precipitación aportan información indirecta sobre la estabilidad climática y los aportes hídricos acumulativos en etapas críticas del ciclo agrícola. En conjunto, los hallazgos confirman que las variables hídricas y atmosféricas son determinantes en la producción de soja y constituyen una base para el desarrollo de sistemas de alerta temprana, la planificación agrícola adaptativa y la formulación de políticas públicas orientadas a mitigar los efectos de la variabilidad climática sobre la producción regional.

Por lo tanto, de acuerdo a los resultados obtenidos, se confirma la hipótesis enunciada, referente a la posibilidad de aplicación de técnicas de minería de datos compuesto por la combinación de los algoritmos Random Forest y XGBoost ensamblados con regresión logística; para la detección de patrones significativos de producción de soja en el Departamento Alto Paraná, con grado de precisión de al menos 60 %; en función de las variables de condición climática: temperatura media, humedad, precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, presión atmosférica, cobertura nubosa, viento y evapotranspiración.

Referencias Bibliográficas

- Green Commodities Paraguay. (2024). Soja. Recuperado el 27 de julio de 2024, de <https://greencommoditiesparaguay.org/soja/>
- ABC Color. (2024). Buen rendimiento de soja en Alto Paraná, aunque costos preocupan a agricultores. Recuperado el 1 de septiembre de 2024, de <https://www.abc.com.py/este/2024/03/07/buen-rendimiento-de-soja-en-alto-parana-aunque-costos-preocupan-a-agricultores>
- Science News. (2024). Earth sets global heat records. Recuperado el 27 de julio de 2024, de <https://www.sciencenews.org/article/earth-global-heat-records-climate>
- Vergara, W., Rios, A. R., Trapido, P., & Malarín, H. (2014). Agricultura y clima futuro en América Latina y el Caribe: Impactos sistémicos y posibles respuestas. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Ferri Ramírez, C., Ramírez Quintana, M. J., & Hernández Orallo, J. (2004). Introducción a la minería de datos. Pearson.
- Coria, S. R. (2013). Introducción a la minería de datos y el data warehousing. Ministerio de Agricultura y Ganadería

(MAG). (2025). [Conjunto de datos].

<http://www.mag.gov.py/>

Dirección de Meteorología e Hidrología

(DMH). (2025). [Conjunto de datos].

<https://www.meteorologia.gov.py>

29.- Matemática Aplicada

Análisis del modelo probabilístico de Lee Carter para realizar proyecciones de mortalidad

Autor: Reartes, Eimi Daiana Magali; ereartes@exactas.unca.edu.ar

Orientador/a: Figueroa, Vanessa Edith; vefigueroa@exactas.unca.edu.ar

Universidad Nacional de Catamarca/ Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Resumen

El modelo Lee-Carter es una herramienta estadística ampliamente utilizada para proyectar tasas de mortalidad, destacada por su capacidad de capturar la evolución temporal del fenómeno, lo cual resulta fundamental para el estudio demográfico de un país. Este trabajo se enmarca en una investigación teórico-metodológica orientada a profundizar en su formulación matemática, su proceso de estimación y las variantes surgidas desde su propuesta original en 1992 por Ronald Lee y Lawrence Carter. Se analiza detalladamente la formulación del modelo, en particular el uso del Análisis de Componentes Principales (PCA) para estimar los parámetros que capturan la mortalidad por edad y su dinámica temporal, lo que permite extraer el primer componente dominante a partir de la matriz de tasas de mortalidad. Como resultado, se sistematizan los principales desafíos asociados a la estimación, identificación y proyección, y se elabora un glosario técnico que facilita la comprensión del modelo, especialmente para estudiantes e investigadores que se inician en el análisis demográfico desde una perspectiva cuantitativa. Esta etapa teórica constituye la base para futuras aplicaciones en contextos demográficos reales, buscando comprender la estructura interna del modelo, sus supuestos estadísticos, su proceso de ajuste, y los desafíos que presenta su implementación desde una perspectiva matemática.

Palabras clave: Modelo Lee-Carter, estimación de parámetros, proyecciones de mortalidad.

INTRODUCCIÓN

Conocer la evolución demográfica de un país es fundamental para su planificación social, sanitaria y financiera. Las herramientas que ofrecen la Probabilidad y la Estadística permiten estudiar fenómenos como la fecundidad, la mortalidad y la migración, aspectos claves para comprender la dinámica de una comunidad. En este sentido, existen modelos probabilísticos que permiten realizar proyecciones de mortalidad específicas de un país en un determinado período de tiempo.

Uno de los modelos más influyentes en este campo es el de Lee-Carter (1992), ampliamente utilizado por su flexibilidad y capacidad de ajuste a distintos contextos. Su formulación responde a las limitaciones que presentaban los métodos tradicionales de proyección demográfica, los cuales no incorporaban de manera adecuada la incertidumbre ni la dinámica temporal de la mortalidad (García Guerrero & Ordorica Mellado, 2012).

El modelo probabilístico de Lee-Carter (1992) tiene como finalidad proyectar la mortalidad poblacional de un país, su formulación tiene una estructura log-lineal por edad y además implementa descomposición en valores singulares (DVS) para estimar los parámetros que componen el modelo, así mismo genera intervalos que proyecta el índice temporal (Lee & Carter, 1992).

Desde su incorporación, el modelo de Lee-Carter ha sido objeto de múltiples extensiones y variantes que buscan mejorar su precisión y adaptabilidad a distintas poblaciones con el fin de ajustar el modelo a diferentes estructuras de acuerdo con el contexto poblacional (Andreozzi, 2018).

El presente trabajo se plantea como una investigación teórico-metodológica ya que tiene como objetivo explorar y describir la fundamentación teórica del modelo probabilístico de Lee-Carter asociado a pronósticos de mortalidad, el procedimiento de estimación de los parámetros con los que trabaja el modelo, las limitaciones que surgen a partir del modelo original permitiendo así el análisis del surgimiento de variantes del modelo.

Posteriormente, para contextualizar el análisis, se presentarán conceptos claves de demografía como la esperanza de vida, las tasas de mortalidad, la estructura etaria y la transición demográfica.

Como conclusión, se discutirá sus ventajas y limitaciones que resultan de la comprensión integral del modelo de Lee-Carter, destacando sus alcances y fortalezas.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es formalizar y clarificar la formulación del modelo Lee-Carter desde un enfoque teórico-metodológico, analizar

el procedimiento de estimación de los parámetros realizando un análisis de componentes principales. Luego, como segunda etapa es de suma importancia analizar las limitaciones que surgen a partir de la estimación. Todo ello, se presentará con glosario técnico que sirva como base para aplicaciones futuras.

Asimismo, se describe las variantes que han surgido del modelo original permitiendo formar las bases teóricas para su desarrollo en un posterior análisis.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se centra en una investigación teórico-metodológica orientada a profundizar en la formulación matemática del modelo de Lee-Carter, quienes utilizan el método de descomposición de valores singulares (DVS) para el proceso de estimación de los parámetros que componen el modelo. Por otro lado, se utilizará el método de Newton-Raphson para reestimar el índice temporal del modelo.

Para finalizar se mencionará las variantes que han surgido desde su propuesta original en 1992 por Ronald Lee y Lawrence Carter, el recurso base

de este trabajo es el artículo principal de Lee, R. D., & Carter, L. R. (1992).

RESULTADOS

ORIGEN Y EVOLUCIÓN DEL MODELO DE LEE-CARTER

El modelo de Lee-Carter (1992) combina métodos estadísticos de series temporales que proyecta tasas de mortalidad específicas por edad popularizados por (Box & Jenkins, 1976) y utiliza DVS para el análisis de las componentes principales para extraer un índice único variable en el tiempo del nivel de mortalidad, y además permite incorporar intervalos de confianza para sus pronósticos. Las fortalezas del método son su simplicidad y robustez en el contexto de tendencias lineales en tasas de mortalidad específicas por edad (Booth, Hyndman, & Tickle, 2006).

Su formulación surge en un contexto donde los modelos tradicionales de proyección presentaban limitaciones significativas al asumir tendencias deterministas en la mortalidad.

Lee y Carter (1992) utilizaron como base el método propuesto por Coale y Kisker (1990) y Coale y Guo (1989) que utiliza tablas de vida y permite estimar tasas de mortalidad. Por otro lado, mencionan que podrían estimar los parámetros con el método de descomposición de valores singulares

(DVS) de la matriz de tasas de mortalidad y construir un sistema de tabla de vida de dos parámetros, fijando un parámetro y pronosticando el otro. Asimismo, mencionan la posibilidad de realizar un ajuste a los logaritmos de las tasas de mortalidad como hicieron Wilmoth (1990) y Wilmoth, Vallin y Caselli (1989), que incluyen efectos aditivos de edad y periodo (Lee & Carter, 1992, pág. 660).

El procedimiento de estimación inicia con la aplicación de DVS a la matriz logarítmica de tasas de mortalidad, extrayendo la componente principal dominante. Posteriormente, se ajusta el modelo utilizando un proceso Autorregresivos Promedio Móvil, (ARIMA) que permite realizar proyecciones estocásticas del componente temporal y, con ello, de la mortalidad futura de una población.

Lee y Carter (1992) fundamentan su propuesta en la necesidad de capturar las dinámicas esenciales de la mortalidad mediante un único parámetro temporal, siguiendo así una tradición de modelización parsimoniosa. El modelo permite construir una familia entera de tablas de vida uniparamétricas, interpolando o extrapolando a partir de dos tablas de vida de referencia (Lee & Carter, 1992).

Finalmente, el modelo también se nutrió de experiencias prácticas y análisis exploratorios de datos, como los

desarrollados por Gómez (1990), quien realizó un análisis exploratorio de la matriz de tasas de mortalidad (Lee & Carter, 1992, pág. 661). Si bien estos trabajos no proponían un modelo estructurado como el de Lee-Carter, permitieron evidenciar patrones persistentes que justificaron su posterior formalización.

MODELO PROBABILÍSTICO DE LEE-CARTER PARA EL PRONÓSTICO DE LAS TASAS DE MORTALIDAD

El modelo inicialmente planteado por Lee y Carter parte de la relación lineal entre el logaritmo de la tasa central de mortalidad y las variables explicativas del fenómeno tales como edad y tiempo (Ochoa Molina, 2015).

La tasa central de mortalidad es el índice de muerte medio para un intervalo de edad específico $[x, x + 1)$ durante el año t se define como

$$m_{x,t} = \frac{D_{x,t}}{E_{x,t}}$$

Donde; $D_{x,t}$ son el número de las defunciones observadas en un grupo de edad $[x, x + 1)$ durante el año t y, $E_{x,t}$ es la población expuesta al riesgo durante el año t en el grupo de edad $[x, x + 1)$.

Lee-Carter proponen organizar estas tasas centrales de mortalidad a través de la construcción de una matriz

ordenada por filas de acuerdo con las edades y columnas según el año.

Matemáticamente, la ecuación que se ajusta al modelo log-lineal es:

$$m_{x,t} = e^{(a_x + b_x k_t + e_{x,t})}, \quad (2)$$

con $t = 1, \dots, n$ y $x = 1, \dots, r$.

Aplicando logaritmos naturales, se obtiene la expresión linealizada del modelo:

$$\ln(m_{x,t}) = a_x + b_x \cdot k_t + e_{x,t}, \quad (3)$$

donde:

a_x : denominado como parámetro de forma, describe el patrón de las tasas específicas de mortalidad. Dicho parámetro se estima como el promedio de los logaritmos de las tasas específicas de cada edad en el tiempo.

b_x : Parámetro (o base, o función base) de sensibilidad. Representa la variación de la tasa de la mortalidad en el intervalo que se inicia a la edad x , ante cambios en el índice general de mortalidad k_t . Este parámetro describe la intensidad en el crecimiento o decrecimiento de la tasa de mortalidad, para un grupo de edad a través del tiempo.

En una proyección de mortalidad se espera que este parámetro refleje lo rápido que decrecen los índices en respuesta a los cambios de k_t .

k_t : Los valores representan la tendencia de la mortalidad a lo largo del periodo t .

$e_{x,t}$: Es el error aleatorio.

r : Es el inicio del último intervalo de edad.

Como el modelo trabaja con función exponencial las tasas específicas de mortalidad no pueden tomar valores negativos.

Lee-Carter propone estimar b_x y k_t utilizando Descomposición en Valores Singulares (DVS), de esta manera al tener una matriz de las tasas de mortalidad podemos aproximarla con una matriz de rango uno.

Si bien existen otras propuestas para la estimación, tales como mínimos cuadrados o máxima verosimilitud, entre otras, no se obtienen grandes ganancias con respecto al uso de DVS con un costo computacional superior (Andreozzi, 2018).

AJUSTE DEL MODELO

En primera instancia se expresará el modelo de forma matricial a partir de la expresión (2), se deduce que existe una ecuación para cada intervalo de edad y tiempo y se tienen que resolver para estimar los valores de los parámetros y del índice de k_t .

Luego, el modelo de Lee-Carter se puede escribir matricialmente como:

$$M = A + b \cdot k \quad (3)$$

donde M es una matriz de dimensión $r \times n$ en la que cada elemento $M_{i,j}$ corresponde al logaritmo natural de la tasa específica de mortalidad para cada grupo de edad i en el año j . Simbólicamente M tiene la forma:

$$M = \begin{pmatrix} \ln(m_{1,1}) & \ln(m_{1,2}) & \cdots & \ln(m_{1,n}) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \ln(m_{r,1}) & \ln(m_{r,2}) & \cdots & \ln(m_{r,n}) \end{pmatrix}.$$

Por otro lado, la matriz A es de orden $r \times n$ y además todos los elementos que corresponde al mismo instante j son iguales, es decir, $a_{1j} = a_{2j} = a_{rj}$. De esta manera la matriz A queda expresada como:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{rj} & a_{rj} & \cdots & a_{rn} \end{pmatrix}.$$

A su vez, tanto b como k , representan a un vector columna de dimensión $r \times 1$ y un vector fila de orden $1 \times n$:

$$b = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_r \end{pmatrix} \text{ y } k = (k_1 \quad \dots \quad k_n).$$

Como se sabe, este modelo es indeterminado ya que no existe solución única para (a_x, b_x, k_t) .

Lo que implica que, si multiplicamos uno de los vectores matrices por una constante $c \neq 0$ y dividimos el otro por la misma

constante, el producto queda expresado como:

$$b_x \cdot k_t = c b_x \cdot \frac{k_t}{c},$$

generando familias infinitas de soluciones que producen el mismo ajuste del modelo.

Supongamos que tenemos la solución (a_x, b_x, k_t) que satisface la expresión (3), entonces para toda constante distinta de cero también es una solución:

$$(a_x, b_x c, \frac{k_t}{c}).$$

Asimismo, si sumamos una constante a todos los k_t , el modelo también se mantiene en consecuencia:

$$\begin{aligned} \ln(m_{x,t}) &= a_x + b_x \cdot (k_t + c) \\ &= (a_x + b_x c) + b_x k_t. \end{aligned}$$

Lo que esto es equivalente a:

$$a'_x = a_x + b_x k'_t, \text{ con } k'_t = k_t + c.$$

Por lo tanto, $(a_x + b_x c, b_x, k_t + c)$ es otra solución que se ajusta al modelo.

Lo mismo ocurre si restamos una constante c , obteniendo la solución opuesta

$$(a_x - b_x c, b_x, k_t + c).$$

De esta manera es que para obtener una única solución y así garantizar la unicidad de la solución, se plantean dos

supuestos necesarios, se debe normalizar para que la suma de los valores de b_x sea igual a 1, y a la suma de los valores k_t se les impone que debe dar como resultado 0, simbólicamente es:

$$\sum_{x=1}^r b_x = 1 \text{ y } \sum_{t=1}^n k_t = 0.$$

Lo cual implicara que los coeficientes a_x de la matriz A son simplemente las medias aritméticas (o promedio) a lo largo del tiempo de los logaritmos naturales de las tasas específicas de mortalidad $\ln(m_{x,t})$.

Por lo tanto, los coeficientes a_x se obtienen estimando de la siguiente manera:

$$M = A + b.k,$$

es equivalente a

$$\sum_{t=1}^n \sum_{x=1}^r \ln(m_{x,t}) = \sum_{t=1}^n \sum_{x=1}^r (\hat{a}_x + b_x k_t).$$

Aplicando propiedad de sumatoria en la segunda igualdad, tenemos:

$$\sum_{t=1}^n \sum_{x=1}^r \ln(m_{x,t}) = \sum_{x=1}^r \left(\sum_{t=1}^n \hat{a}_x + \sum_{t=1}^n b_x k_t \right).$$

Como los parámetros a_x y b_x no dependen del tiempo t , podemos expresar como:

$$\sum_{x=1}^r (\hat{a}_x \sum_{t=1}^n 1 + b_x \sum_{t=1}^n k_t).$$

Lo que equivale a tener:

$$\sum_{x=1}^r \hat{a}_x \sum_{t=1}^n 1 + \sum_{x=1}^r b_x \sum_{t=1}^n k_t.$$

Tenemos que $\sum_{t=1}^n 1 = n$ y usando los supuestos de restricción con $\sum_{t=1}^n k_t = 0$ y $\sum_{x=1}^r b_x = 1$, se anula el segundo sumando la igualdad de la derecha, por lo tanto:

$$\sum_{t=1}^n \sum_{x=1}^r \ln(m_{x,t}) = n \sum_{x=1}^r \hat{a}_x.$$

De esta manera, tenemos que:

$$\hat{a}_x = \frac{\sum_{t=1}^n \ln(m_{x,t})}{n},$$

y además cumple con los supuestos de restricción.

Es así como podemos determinar los valores de la matriz A.

Luego, la expresión (3) se puede reescribir construyendo una matriz centrada M^* , como:

$$M^* = M - A \approx b.k. \quad (4)$$

En términos de sumatoria queda expresado como:

$$\ln(m_{x,t}^*) = \ln(m_{x,t}) - \frac{\sum_{t=1}^n \ln(m_{x,t})}{n}$$

$$\approx \sum_{t=1}^n \sum_{x=1}^r b_x k_t.$$

A partir de esta construcción, de esta manera podemos decir que la matriz centrada M^* tiene elementos $\ln(m_{i,j}^*)$, y así podemos estimar a b_x y k_t , como los primeros vectores derecho e izquierdo. Entonces,

$$\ln(m_{x,t}^*) \approx \sum_{t=1}^n \sum_{x=1}^r b_x k_t,$$

donde el producto $b_x k_t$ no está definido ya que el orden $(r \times 1) \cdot (n \times 1)$.

Por ello debemos expresar a este producto como

$$\hat{b}_x k_t = \hat{b}_x \cdot k_t^T.$$

Este parámetro podría ser estimados mediante Mínimos Cuadrados Ordinarios, sin embargo, dado que no hay una variable observable en el lado derecho de la expresión (4), no es posible usar dicho método para estimar los parámetros.

El método de Descomposición en Valores Singulares (DVS) proporciona un ajuste exacto de Mínimos Cuadrados (M. L. Good, 1969) que brinda valores aproximados de rango 1 para los estimadores de los vectores de parámetros.

Este método de DVS consiste en descomponer la matriz M^* en tres matrices, de tal manera que se identifique una componente principal que permita capturar la mayor parte de variación en las tasas logarítmicas.

Adecuadamente, la factorización de DVS indica que; $\forall M \in \mathbb{R}^{r \times n}$ de rango $p \leq \min(r, n)$, existen matrices ortonormales U de orden $r \times r$ y V de orden $n \times n$, y una matriz diagonal Σ de orden $r \times n$

$$M^* = U \cdot \Sigma \cdot V^T \quad (5),$$

donde:

M^* es la matriz centrada de dimensión $r \times n$.

U es una matriz $r \times r$ ortonormal, cuyas columnas son independientes y de norma unitaria y representan a los vectores singulares izquierdos.

La matriz Σ es diagonal de orden $r \times n$, donde cada uno de los elementos en la diagonal corresponde a valores singulares mayores o iguales a cero de la matriz original, estos valores aparecen ordenados en forma decreciente $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_p \geq 0$.

Finalmente, V^T es la transpuesta de la matriz V , la cual es una matriz ortonormal de dimensión $n \times n$ y contiene los vectores singulares derechos de la expresión.

Si se excluyen las posibles permutaciones de las filas de U o de Σ , como también las combinaciones lineales

de éstos, la descomposición se realiza sobre la matriz M^* (ya que tiene solución única).

Si ahora se definen $B = U$ y $K^T = \Sigma V^T$, la expresión (5), se convierte en:

$$M^* = B \cdot K^T.$$

Como las matrices B y K son matrices, a diferencia de los vectores b_x y k_t planteados originalmente, el método de DVS descompone a M^* en el producto de dos matrices, el elemento (i, j) en esta matriz resulta ser la suma del producto del renglón i de B y del renglón j de K , esto es

$$m_{x,t}^* = \sum_{j=1}^r B_{i,j} K_{j,i}^T$$

Por lo tanto, la descomposición produce r términos que ajustan exactamente el elemento $m_{i,j}^*$, de la matriz M^* . Los términos sucesivos tendrán menor valor absoluto (debido a las propiedades de las matrices Σ , U y V originales) por lo que, si la mayoría de los elementos de Σ son iguales o cercanos a cero, se puede lograr una buena aproximación de cada elemento, además a medida que se incrementa el número de términos usados, el grado de precisión en el ajuste mejorará sólo marginalmente. En particular, el primer término $B_{i,1} K_{j,1}^T$ constituye la mejor aproximación de una dimensión para cada elemento (i, j) . Por lo cual, en este paso se

debe buscar el menor número de términos que den una aproximación razonable a la matriz M^* . Si bien un mayor número de términos proporcionan un mejor ajuste a los datos, puede que no exista una razón adicional en el modelo para incluirlos, como señalan Lee y Carter (1992). Por ello aconsejan descomponer M^* mediante un producto de los vectores b y k . Es por ello por lo que, al realizar la DVS sólo consideraron la aproximación de primer orden, es decir, M^* se aproxima como

$$M^* \approx B_1 K_1^T.$$

Así quedan determinados $b_1 = B$ y $k_1 = K$, con lo cual se obtiene una primera estimación de los parámetros del modelo.

$$M^* \approx b_1 k_1^T.$$

O bien,

$$M^* \approx \sigma_1 u_1 v_1^T$$

Se puede observar de esta expresión que el primer término constituye la mejor aproximación unidimensional según el teorema de Eckart – Young (1936).

Sin embargo, los resultados que se adquieren de la primera estimación del modelo no proporcionan el número real de muertes para el total de edades, es decir que no es un buen ajuste debido a que la estimación se realiza sobre los logaritmos de las tasas de mortalidad, generando tasas estimadas que difieren a las analizadas, lo cual produce un sesgo y con ello deriva la posibilidad de que se

produzca desviaciones en las proyecciones, porque la estimación de k_t ha sido realizada minimizando los errores en los logaritmos y no en las propias tasas de mortalidad. Este problema puede eliminarse estimando el índice de ajuste de manera que el número de muertes que se observaron sea igual a las que se espera.

En consecuencia, Lee y Carter (1992) se propone un segundo paso para la estimación de k_t usando los valores de \hat{a}_x y \hat{b}_x obtenidos en una primera instancia. Para ello, se utiliza una distribución de población específica, de tal manera que produzca exactamente el número observado de muertes totales para el año en cuestión, utilizando la siguiente expresión:

$$D_t = \sum_{x=0}^r N_{x,t} e^{(a_x + b_x k_t + e_{x,t})}, \quad (6)$$

Donde:

D_t , representa el número total de muertes en el año t ,

$N_{x,t}$, es la población que pertenece al intervalo de edad $[x, x + 1)$ en el año t y,

r , es la edad del último grupo etario observado.

De esta manera podemos volver a reestimar k_t sustituyendo las estimaciones obtenidas de los parámetros a_x y b_x .

SEGUNDO AJUSTE

El modelo original Lee – Carter asume homocedasticidad en los errores; pero este supuesto no se cumple con datos de tablas de vida para edades avanzadas al tener pocos datos para la exposición, los estimadores presentan alta varianza en contraste con los estimadores de edades tempranas. Por esta razón, Lee – Carter (1992), indican que se debe reestimar k_t mediante búsqueda iterativa para que las muertes ajustadas resultantes coincidan con el número total de muertes observadas en los datos en cada año t . Este ajuste interactivo se realizará utilizando el método Newton – Raphson a la expresión (6) con la finalidad de minimizar el error entre las muertes observadas y las muertes esperadas en cada iteración. La expresión por desarrollar es:

$$\hat{D}_t = \sum_{x=0}^r N_{x,t} e^{(\hat{a}_x + \hat{b}_x \hat{k}_t)}.$$

El ajuste del índice temporal en cada paso iterativo se obtiene igualando la diferencia entre las muertes observadas y las muertes estimadas a cero para que las mismas coincidan:

$$\sum_{x=0}^r N_{x,t} e^{(a_x + b_x k_t)} - \hat{D}_t = 0,$$

y derivada se tiene que:

$$\sum_{x=0}^r N_{x,t} b_x e^{(a_x + b_x k_t)}.$$

Luego se tiene que la actualización de del valor del índice temporal en cada iteración es:

$$\tilde{k}_t \approx \hat{k}_t - \frac{\sum_{x=0}^r N_{x,t} e^{(a_x + b_x k_t)} - \hat{D}_t}{\sum_{x=0}^r N_{x,t} b_x e^{(a_x + b_x k_t)}}.$$

Donde el numerador puede indicar un exceso o déficit de muertes esperadas frente a las observadas, mientras que el denominador muestra la sensibilidad de esas muertes esperadas frente a cambios en el índice temporal. Este procedimiento permite ajustar el modelo de tal manera que permita mejorar los valores de las muertes observadas con respecto a las esperadas.

Aunque en el artículo base de Lee – Carter (1992) no se menciona explícitamente el uso del método de Newton – Rapshon para reestimar k_t , se ha indagado que es ampliamente utilizado en otros artículos para solucionar este problema y así mejorar la precisión del modelo. Es una técnica iterativa que se utiliza para encontrar las raíces de una ecuación no lineal.

Además, la segunda estimación del parámetro k_t si bien se puede considerar apropiada, no es óptima y es por esta razón que se han propuesto diversos cambios en la formulación y supuestos del modelo. En particular, estos cambios se plantearon a partir de que se observó que el método original presentaba algunos problemas, como es la introducción de sesgo en las proyecciones (Andreozzi, 2012).

En consecuencia, a las alteraciones que fue teniendo el modelo es importante señalar la diferencia de variantes y extensiones. Las variantes implican modificaciones en la forma de ajustar o alternativas en supuestos que asume el modelo de LC sin alterar la formulación matemática del mismo. En cambio, una extensión del modelo se refiere a una modificación en su expresión original.

VARIANTES DEL MODELO

LEE-CARTER

El modelo propuesto por Ronald D. Lee y Lawrence R. Carter en 1992 surge como respuesta a la necesidad de contar con una herramienta interpretable y estadísticamente robusta para proyectar tasas de mortalidad, desde su formulación ha sido objeto de diversas adaptaciones y mejoras, con el fin de incrementar su precisión y aplicabilidad en distintos contextos poblacionales.

Uno de los principales desafíos ha sido su aplicación en casos donde los datos son incompletos o presentan alta variabilidad. En respuesta a estas limitaciones, se han desarrollado variantes que optimizan la estimación de los parámetros, originalmente realizados mediante SVD, lo que permite identificar patrones históricos completos.

Una de las primeras es introducida por Wilmoth (1993) y con ella propone realizar

la estimación del modelo Lee-Carter mediante la aplicación de mínimos cuadrados ponderados, utilizando como ponderaciones el número de muertes observadas para el grupo de edad respectivo.

Lee-Miller (2001), incorporó tres cambios clave, el primero fue ajustar el periodo analizado, el segundo ajustar el índice temporal para reproducir la esperanza de vida de cada año en vez de igualar las defunciones totales y, por último, fija el punto de partida con las tasas reales de mortalidad del último año del periodo base, lo que elimina el sesgo de arranque. Por otro lado, Booth-Maindonald-Smith (2002) también realizaron mejoras en el período analizado utilizando como criterios estadísticos de bondad de ajuste bajo la suposición de un del índice temporal lineal; a su vez esto implica el ajuste a la distribución de edad de las muertes usando un modelo de regresión de Poisson; y las tasas de inicio se consideran como las tasas ajustadas basadas en esta metodología de ajuste (Booth, Hyndman, & Tickle, 2006).

Li, Lee y Tuljapurkar (2004) considera cómo se puede utilizar cuando hay pocas observaciones en intervalos desiguales, el primer ajuste se realizó utilizando la primera y última observación, y por lo tanto se puede generar con solo dos observaciones. Con tres puntos de datos, también se puede estimar la incertidumbre,

aunque tales estimaciones de incertidumbre son en sí mismas muy inciertas y mejoran con observaciones adicionales (Li & Lee, 2004).

Brouhns, Denuit y Vermunt (2002) sustituyeron la DVS que utilizó Lee-Carter por una regresión log-bilineal Poisson utilizando modelos lineales generalizados. Esta formulación permite variantes tales como utilizar distribuciones binomial negativa y binomial, en lugar de la Poisson (Gómez, 2015).

GLOSARIO

Conceptos Demográficos

En el análisis y proyección de la mortalidad mediante el modelo Lee-Carter, se sistematizan los principales conceptos demográficos fundamentales. Trabajos como los de Debón et al. (2013) y Andreozzi (2009) utilizan marcos conceptuales clásicos de la demografía para sustentar la formulación, estimación y aplicación del modelo Lee-Carter. A continuación, se desarrollan y explican los conceptos que conforman la base teórica del análisis cuantitativo de la mortalidad.

- *Tasa específica de mortalidad por edad*

La tasa específica de mortalidad es la medida fundamental para el análisis demográfico de la mortalidad. Se calcula como el cociente entre el número de defunciones en un grupo etario específico

durante un período y la población expuesta al riesgo en ese grupo. Es la variable dependiente modelada por Lee-Carter. Simbólicamente:

$$m_{xt} = \frac{D_{xt}}{E_{xt}},$$

donde D_{xt} son las defunciones y E_{xt} es la población expuesta al riesgo.

- *Esperanza de vida*

Esperanza de vida es una medida resumen del nivel de mortalidad general de una población. Una vez que se proyectan las tasas específicas de mortalidad se calcula la esperanza de vida a través de una tabla de vida, sumando los años vividos por una cohorte hipotética de nacimiento y dividiéndolos por el número inicial. Se interpreta como el número promedio de años que se espera que viva un recién nacido, asumiendo que las tasas de mortalidad por edad observadas en un año determinado se mantendrán constantes a lo largo de su vida.

Se emplea tanto para validar los resultados del modelo como para evaluar su desempeño frente a proyecciones oficiales. La esperanza de vida es uno de los resultados derivados más importantes que obtenemos usando las tasas proyectadas por Lee-Carter que permite verificar la calidad del modelo.

- *Tablas de vida*

Las tablas de vida, son construcciones demográficas que resumen las

probabilidades de muerte y supervivencia en cada edad de una cohorte hipotética de nacimiento. Se construyen a partir de tasas específicas de mortalidad y permiten derivar múltiples medidas, como la esperanza de vida, la probabilidad de sobrevivencia, el número esperado de muertes. En el modelo Lee-Carter, las tasas proyectadas se utilizan para generar tablas de vida futuras, lo que permite interpretar el impacto de las variaciones en la mortalidad sobre la estructura demográfica.

- *Exposición al riesgo*

La exposición al riesgo se refiere al total de tiempo (medido en personas-año) durante el cual la población está expuesta al riesgo de morir en un grupo de edad. Es el denominador de la tasa específica de mortalidad. Generalmente no se mide el tiempo exacto que cada individuo estuvo en riesgo, se aproxima usando el promedio de la población a mediados del año o el tamaño del grupo poblacional promedio. La correcta estimación de la exposición al riesgo es crucial para obtener tasas válidas y comparables; de lo contrario, los análisis posteriores pueden resultar sesgados o erróneos.

Se aproxima, como el tamaño poblacional en la mitad del período multiplicado, por la duración del intervalo. Se estima como el promedio poblacional durante el intervalo o mediante métodos indirectos.

- *Proyección de la mortalidad*

La proyección de la mortalidad consiste en estimar tasas de mortalidad futuras utilizando modelos estadísticos basados en tendencias históricas. Con la metodología de Lee-Carter, la proyección se realiza a través del índice k_t , que representa la tendencia temporal de la mortalidad global. Una vez estimado y proyectado k_t se reconstruyen las tasas m_{xt} proyectadas. Estas tasas proyectadas, permiten anticipar cambios futuros en la estructura, por edad de la mortalidad y calcular indicadores como la esperanza de vida futura.

- *Distribuciones por edad de la muerte*

Las distribuciones por edad de la muerte, consiste en una comparación, entre la distribución proyectada y observada de muertes por edad. Se representa como se distribuyen las defunciones por edad, en una población. Se puede graficar como una curva que muestra la cantidad (o proporción) de muertes a cada edad. Un modelo demográfico válido, debería reproducir adecuadamente la forma de esta distribución. El modelo Lee-Carter, se usa para validar la calidad del ajuste, si las tasas proyectadas reflejan no solo los totales, sino también la forma realista de la mortalidad por edad.

- *Intervalos de predicción*

Los intervalos de predicción son técnicas utilizadas para incorporar

incertidumbre en los modelos de proyección. En el caso del modelo de Lee-Carter, una vez proyectado k_t , mediante un modelo Autorregresivo Integrado de Promedios Móviles (ARIMA), se pueden generar múltiples trayectorias simuladas de k_t para construir un conjunto de tasas m_{xt} posibles. A partir de estas trayectorias, se derivan intervalos de confianza para las tasas y para indicadores como e_0 (esperanza de vida). Este enfoque permite cuantificar la variabilidad esperada de los resultados y hacer proyecciones más robustas y realistas.

- *Estructura por edades*

La estructura por edades de una población describe cómo se distribuyen sus integrantes, en distintos grupos etarios en un momento determinado. Esta distribución resulta fundamental para interpretar adecuadamente los patrones de mortalidad y, por ende, para la correcta aplicación de modelos, como el de Lee-Carter. Este modelo asume que la mortalidad varía sistemáticamente con la edad, y que esta variación puede capturarse mediante un patrón base por edad, acompañado de un coeficiente de sensibilidad de cada grupo etario respecto a los cambios temporales en la mortalidad. En otras palabras, la forma en que se distribuye la población por edades condiciona cómo afectan los cambios en la mortalidad global sobre cada grupo etario.

Tanto en la tesis de Andreozzi (2009) como en el trabajo de Debón et al. (2013), se enfatiza que un modelo de mortalidad adecuado debe reproducir no solo valores agregados, como la esperanza de vida, sino también la forma de la curva de mortalidad por edad. Dicha curva, está vinculada con la estructura etaria, ya que refleja el perfil esperado de muertes a lo largo del ciclo de vida. Por este motivo, validar que las proyecciones mantengan una forma coherente con la distribución de muertes observadas constituye un criterio esencial de ajuste del modelo.

DISCUSIÓN

El modelo probabilístico de Lee-Carter ha demostrado ser una herramienta sumamente influyente en el análisis y proyección de la mortalidad. Entre sus ventajas principales, se observa que tiene simplicidad y parsimonia, ya que logra describir la dinámica de la mortalidad a través de un único índice temporal, reduciendo la complejidad de modelar tasas específicas para cada edad y cada año. Esta característica facilita su interpretación y lo convierte en un modelo flexible para distintos contextos demográficos. En segundo lugar, su formulación permite que las tasas proyectadas nunca adopten valores negativos, lo cual es coherente con la naturaleza del fenómeno. Finalmente, su adaptabilidad ha sido una de sus mayores

fortalezas, desde su publicación en 1992, el modelo ha dado lugar a variantes y adaptaciones que mejoran la precisión del ajuste en diferentes poblaciones, lo que muestra su vigencia y capacidad de adaptación.

Sin embargo, el modelo también presenta limitaciones importantes. Una de ellas es el método de estimación principal minimiza errores sobre los logaritmos de las tasas, lo que puede generar sesgos en el número total de muertes proyectadas. Este problema obliga a una reestimación mediante métodos iterativos, como Newton–Raphson, lo que aumenta la complejidad técnica del ajuste. Por otro lado, el supuesto de homocedasticidad en los errores no se cumple en edades avanzadas, debido al bajo tamaño poblacional expuesto al riesgo, lo que produce alta varianza y reduce la confiabilidad del modelo en esos grupos etarios. Asimismo, se observa que el modelo presenta un aspecto crítico a la sensibilidad a la calidad de los datos constituye un desafío en poblaciones con información. Finalmente, al suponer que la dinámica de la mortalidad puede capturarse con un único componente temporal resulta, en algunos casos, una simplificación excesiva, especialmente en contextos donde influyen factores de cohorte o choques epidemiológicos que alteran las tendencias de manera no lineal.

El análisis de tales ventajas y

limitaciones en esta investigación teórico-metodológica permite sentar las bases para un uso más consciente y crítico del modelo para lograr adecuarlo a futuros proyectos de investigaciones en la provincia de Catamarca. Además, la preocupación siguiente para continuar con una guía trabajo es tomar la decisión de cual método se usará para realizar el segundo ajuste de tal manera que sea un buen ajuste para los datos que se puedan obtener y de esta manera realizar una confiable proyección con el modelo de ARIMA, teniendo en cuenta las desventajas y ventajas que pueden surgir en el desarrollo de dicha investigación.

Por otro lado, profundizar en el procedimiento de Descomposición en Valores Singulares (DVS) como técnica de estimación. desde un punto de vista algebraico, DVS permite aproximar la matriz de tasas de mortalidad con un rango reducido, capturando su estructura principal. Este proceso es equivalente al Análisis de Componentes Principales (PCA), que interpreta dicha descomposición en términos de reducción de la dimensionalidad de una matriz de datos multivariados (como tasas de mortalidad por edad y año). Así, el primer componente principal describe la tendencia dominante de la mortalidad en el tiempo, mientras que los parámetros por edad reflejan la sensibilidad de cada grupo etario ante cambios en esa tendencia.

CONCLUSIONES

El presente trabajo profundizó la formulación matemática del modelo probabilístico de Lee-Carter, destacando su carácter teórico-metodológico y sentando las bases para aplicaciones futuras en contextos demográficos reales. Se abordó la estructura log-lineal del modelo, el proceso de estimación de los parámetros y la problemática de la indeterminación, así como los supuestos de identificación necesarios para garantizar unicidad en las soluciones.

Aunque, se ha observado que el modelo Lee-Carter constituye una base teórica robusta y ampliamente validada, que combina accesibilidad metodológica con capacidad predictiva. En su aplicación práctica debe contemplar tanto sus limitaciones estadísticas como los supuestos que lo sustentan. Estas consideraciones explican el surgimiento de variantes y extensiones en la literatura, orientadas a superar las restricciones del modelo original.

Asimismo, se identificaron los principales desafíos que plantea el modelo original, como la necesidad de reestimar el índice temporal para ajustar el número total de defunciones, la heterogeneidad de la varianza en edades avanzadas y la sensibilidad a la calidad de los datos al suponer que asume homocedasticidad en los errores. Estas limitaciones han dado lugar al surgimiento de variantes

metodológicas (como las propuestas por Wilmoth, Lee-Miller, Booth-Maindonald-Smith o Brouhns-Denuit-Vermunt, que ofrecen alternativas de estimación y ajuste bajo diferentes supuestos estadísticos.

Finalmente, se elaboró un glosario técnico que sistematiza conceptos fundamentales en el análisis de la mortalidad (tasas específicas, esperanza de vida, tablas de vida, exposición al riesgo, estructura etaria, entre otros), contribuyendo a la comprensión del modelo y facilitando su uso por parte de estudiantes e investigadores.

En conclusión, este estudio constituye una primera etapa teórica que no solo clarifica la base matemática y estadística del modelo Lee-Carter, sino que también pretende ofrecer una base sólida para su futura aplicación empírica en contextos específicos, aportando al análisis de la dinámica de la mortalidad.

REFERENCIAS

- Aguilar Fernández, E. (2013). Estimación y proyección de la mortalidad para Costa Rica con la aplicación del método Lee-Carter con dos variantes.
- Andreozzi, L. (2012). Estimación y pronósticos de la mortalidad de Argentina utilizando el modelo de Lee-Carter. *Revista de la Sociedad Argentina de Estadística*, 10, págs. 21-43.
- Andreozzi, L. (2018). *Métodos probabilísticos de pronóstico de la mortalidad y su aplicación a tres departamentos de la provincia de Córdoba*.
- Booth, H., Hyndman, R. J., & Tickle, L. &. (2006). Lee-Carter mortality forecasting: a multi-country comparison of variants and extensions. 15, págs. 289-310.
- García Guerrero, V. M., & Ordorica Mellado, M. (2012). *Proyección estocástica de la mortalidad mexicana por medio del método de Lee-Carter*. Estudios demográficos y urbanos.
- Gómez, N. D. (2015). Proyección de la población universitaria utilizando el modelo Lee-Carter. *Comunicaciones en Estadística*, 8(1), págs. 173-192.
- Lee, R. D., & Carter, L. R. (1992). Modeling and forecasting US mortality. *Journal of the American statistical association*, Issue 419, 87, 659-671.
- Li, N., & Lee, R. &. (2004). Using the Lee-Carter method to forecast mortality for populations with limited data. 72(1), págs. 19-36.
- Miranda, M. C. (2016). *Modelación matemática de la fuerza de mortalidad y su aplicación a finanzas*. Doctoral dissertation,

Universidad Autónoma
Metropolitana–Iztapalapa.

Ochoa Molina, C. A. (2015). El modelo Lee-
Carter para estimar y pronosticar
mortalidad: una aplicación para
Colombia.

C. Eje Ciencias Exactas - 31. Tecnologías de la información y comunicación

El Uso de Inteligencia Artificial (IA) como recurso de Investigación de los alumnos en la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas de la Universidad Nacional de Concepción, Paraguay.

Autor: Avalos Denis Sebastián Nicolas Emmanuel, avalosdenisnicolas@gmail.com

Coautor(es): Jara Méndez Patricia; Ovelar Maldonado Iván Alejandro

Orientadoras: González Pérez Fanny Addalíz; fannygp_90@gmail.es; Rodríguez Vda. de Zavala Myrian Raquel; Cuenca Barrios David Arturo

Universidad Nacional de Concepción-Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas.
Concepción, Paraguay

RESUMEN

Esta investigación tuvo como objetivo determinar el uso de herramientas de Inteligencia Artificial (IA) en la investigación académica por estudiantes del quinto curso de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas de la Universidad Nacional de Concepción en 2024. Se abordaron dos dimensiones: beneficios percibidos y desafíos éticos vinculados al uso de IA. El estudio siguió un enfoque cuantitativo, descriptivo y no experimental. La muestra fue de 84 estudiantes, seleccionados mediante muestreo probabilístico, con margen de error del 5% y nivel de confianza del 95%, calculados sobre una población de 108. Los datos se recolectaron mediante encuestas en Google Forms con 11 preguntas. Los resultados muestran preferencia por ChatGPT y Gemini, mientras que Claude y Poe fueron menos usadas. Los estudiantes reportaron mejoras en calidad y productividad de sus investigaciones, aunque subrayaron la necesidad de validar los resultados. En el plano ético, valoraron la privacidad y la transparencia, defendiendo un uso responsable de la IA, sin considerar que genere plagio de forma directa. En conclusión, los estudiantes reconocen ventajas de la IA en la investigación, pero expresan preocupación por sus implicaciones éticas, destacando la importancia de equilibrar su adopción con prácticas rigurosas de validación.

Palabras clave: Inteligencia artificial, investigación académica, ética.

ABSTRACT

This research aimed to determine the use of Artificial Intelligence (AI) tools in academic research by fifth-year students of the Faculty of Economic and Administrative Sciences at the National University of Concepción in 2024. Two dimensions were addressed: the perceived benefits of AI tools and the ethical challenges associated with their use. The study followed a

quantitative, descriptive, and non-experimental approach. A sample of 84 students was selected through probabilistic sampling, with a 5% margin of error and a 95% confidence level, calculated from a population of 108. Data were collected through Google Forms surveys with 11 questions focused on the mentioned dimensions. The findings revealed a preference for ChatGPT and Gemini, while Claude and Poe were less frequently used. Students reported improvements in the quality and productivity of their research thanks to AI, while stressing the need to critically validate the results. Regarding ethics, respondents highlighted privacy and transparency, advocating for responsible AI use without perceiving it as a direct cause of plagiarism. In conclusion, students acknowledged the advantages of AI in research but also expressed concerns about ethical implications, emphasizing the importance of balancing technological adoption with rigorous validation practices.

Keywords: Artificial intelligence, academic research, ethics.

INTRODUCCIÓN

La Inteligencia Artificial (IA) ha revolucionado diversos campos, incluida la investigación académica, donde ofrece herramientas que automatizan y optimizan procesos intelectuales. Su impacto se refleja en la capacidad para analizar grandes volúmenes de datos, generar hipótesis, revisar literatura y mejorar la productividad, logrando todo esto y más en muy poco tiempo, resaltando a su vez que, en el tiempo actual la información ha pasado de ser escasa a cuantiosa. En definitiva, la IA promete mejorar la productividad de los investigadores. Sin embargo, la incorporación de estas tecnologías también plantea desafíos éticos y metodológicos que deben ser considerados en su uso académico. (Bolaño-García & Duarte-Acosta, 2024)

En la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas de la Universidad Nacional de Concepción, los estudiantes del quinto curso, en la materia de Tesis, enfrentan el desafío de desarrollar investigaciones de calidad, con la posibilidad de integrar herramientas tecnológicas modernas. El uso de herramientas de IA en este proceso les ofrece oportunidades para mejorar la investigación. Pero a la vez, el dilema a la cual se enfrentan hoy es: ¿cómo aprovechar las ventajas de la IA sin caer en problemas éticos o metodológicos?

Muchos de los estudiantes se sienten

entusiasmados por las amplias posibilidades que ofrece la IA para mejorar su productividad y calidad de investigación. Sin embargo, también hay preocupaciones sobre la validez de los resultados que obtienen y el riesgo de depender demasiado de estas herramientas. Este escenario plantea la necesidad de investigar no solo qué herramientas de IA están utilizando estos estudiantes, sino también cómo perciben sus beneficios y cuáles son sus inquietudes éticas. ¿Están realmente preparados para integrar la IA en su trabajo de manera responsable? Abordar estas preguntas es crucial para garantizar que el uso de la IA en la investigación académica se realice de forma ética y efectiva, equilibrando innovación y rigor académico

OBJETIVO GENERAL

Determinar el uso de herramientas de IA en la investigación académica por parte de los estudiantes del quinto curso de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas de la Universidad Nacional de Concepción, año 2024

OBJETIVOS ESPECIFICOS

Identificar los beneficios percibidos al utilizar herramientas de IA en los procesos de investigación

Caracterizar los desafíos éticos que los estudiantes asocian con el uso de herramientas de IA

Inteligencia Artificial (IA) se usa para analizar conjuntos de referencias tan grandes o complejos que no permiten el uso de las técnicas tradicionales de proceso de datos. Entre los desafíos que ello plantea está el análisis, la captura, el tratamiento de los anteriores, la investigación, la puesta en común, el almacenamiento, la transferencia, la visualización, la consulta, la actualización y la protección de la privacidad de la información. (Rodríguez, 2020)

La Inteligencia Artificial es un campo en rápido crecimiento que tiene el potencial de revolucionar diversas industrias, incluidas la educación y la investigación. (UNESCO, 2021)

La IA sintetiza y automatiza tareas intelectuales y es, por lo tanto, potencialmente relevante para cualquier ámbito de la actividad intelectual humana. (Russell & Norvig, 2004). La IA Generativa (IAGen) es una tecnología de inteligencia artificial (IA) que genera contenidos de forma automática en respuesta a instrucciones escritas en interfaces conversacionales de lenguaje natural (prompts) (UNESCO, 2021)

En la investigación académica, las herramientas de IA, como ChatGPT, POE, y Scite.ai, se utilizan para tareas como la revisión de literatura, la generación de hipótesis, la automatización de procesos y el análisis de datos. Estas herramientas

están transformando la forma en que se desarrolla la investigación (Farrelly & Baker, 2023); (UNESCO, 2023). Los principales beneficios del uso de la IA incluyen el ahorro de tiempo, la capacidad de analizar grandes volúmenes de información rápidamente, y la mejora en la precisión de los resultados (Smith, 2022). A pesar de sus beneficios, el uso de la IA plantea importantes desafíos éticos. El sesgo en los algoritmos, la falta de transparencia en los procesos automatizados y la posible dependencia excesiva de estas herramientas pueden afectar la integridad de la investigación académica (Hagendorff, 2020); (UNESCO, 2023) (O'Neil, 2016; Binns, 2018).

La tecnología de inteligencia artificial aporta grandes beneficios en muchos ámbitos, pero sin unas barreras éticas corre el riesgo de reproducir los prejuicios y la discriminación del mundo real, alimentar las divisiones y amenazar los derechos humanos y las libertades fundamentales. (UNESCO, 2024)

La creciente adopción de herramientas de IA en la investigación académica requiere una comprensión clara de sus efectos en el desarrollo de investigaciones. Los estudiantes de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas se encuentran en un punto crucial: deben adaptarse a nuevas formas de trabajar

que pueden facilitar su labor investigativa. Desde un punto de vista académico, entender cómo estos estudiantes utilizan la IA es esencial para mejorar la calidad de la educación y la investigación. En un entorno académico cada vez más competitivo, es fundamental que los estudiantes no solo sean capaces de utilizar la tecnología, sino que también sean críticos con ella.

Según López (2021), las herramientas de IA influyen en la eficiencia en el desarrollo de tesis y otros trabajos académicos. Los resultados sugieren que la IA aumenta significativamente la productividad, pero también plantea preguntas éticas sobre la dependencia tecnológica. Martínez (2022), exploró las barreras percibidas por los docentes al utilizar IA basada en chatbots, así como sus opiniones sobre los beneficios y desafíos éticos asociados. Los resultados reflejaron una dualidad de opiniones en torno a los beneficios y riesgos de la IA, destacando la necesidad urgente de abordar los riesgos éticos y legales relacionados con su uso. Finalmente, Vera (2023) concluye que la IA es vista como una herramienta útil en la enseñanza y la planificación académica, señala una preocupación sobre los aspectos éticos y la necesidad de capacitación docente para su implementación adecuada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la investigación se siguió el enfoque cuantitativo, el tipo de investigación es de carácter descriptiva, con un diseño no experimental. Para determinar el tamaño de la población se consideró a los estudiantes del quinto curso de las diferentes carreras de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas de la Universidad Nacional de Concepción con un total de 108 estudiantes inscriptos para el décimo semestre del año en curso. Con respecto a la muestra, se empleó un muestreo probabilístico, calculando el tamaño de la muestra con un margen de error del 5% y un nivel de confianza del 95%. Se obtuvo un tamaño de muestra de 84 estudiantes del quinto curso de las cuatro carreras de la Facultad que son Ingeniería Comercial, Ingeniería en Informática Empresarial, Contaduría Pública y Licenciatura en Administración. La aplicación de las encuestas ha sido mediante formularios de Google Forms. La técnica empleada para la recolección de datos fue la encuesta, con 15 preguntas referentes al tema en estudio. Este trabajo tuvo como técnica de validez el juicio de experto para garantizar la efectividad del instrumento utilizado. El juicio a experto se define como una opinión informada de personas con trayectoria en el tema, que son reconocidas por otros como expertos

calificados en éste, y que pueden dar información, evidencia, juicios y valoraciones. (Hernández & otros, 2010)

RESULTADO

Luego de aplicar el instrumento para obtener la información de los estudiantes, a continuación, se exponen los datos resultantes relacionados directamente con el objetivo de la presente investigación.

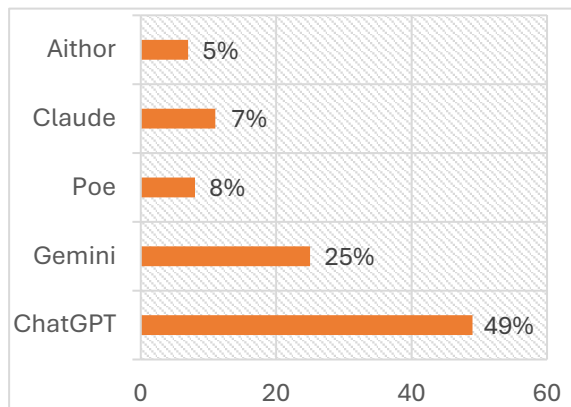
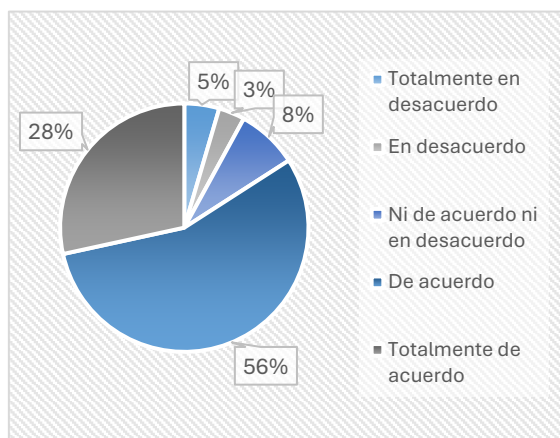


Gráfico N° 1. Estoy informado sobre las herramientas de IA



El gráfico N° 1 muestra que la mayoría de

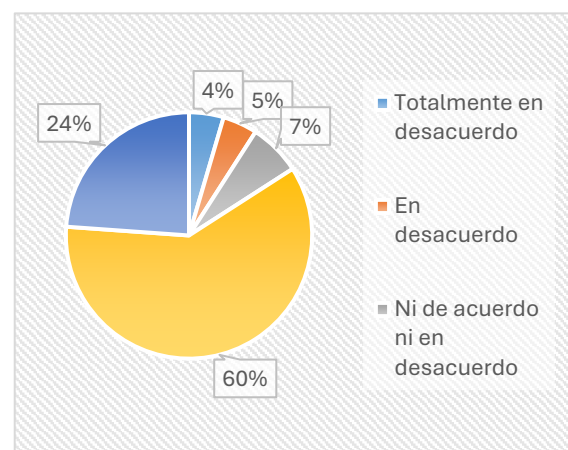
los estudiantes posee un buen nivel de conocimiento acerca de las herramientas de IA aplicadas a la investigación, esto muestra el interés por mantenerse actualizados con la información existente. Sin embargo, aún persiste un 16% que no se ha informado sobre los recursos.

Gráfico N° 2. Comprendo el funcionamiento de las herramientas de IA

Los estudiantes se mostraron muy positivos ante esta afirmación, lo que indica que el 84% comprende cómo funcionan las herramientas de IA mientras que 16% no comprende el funcionamiento.

Gráfico N° 3. Herramientas de IA que utilizo para las investigaciones académicas

En el Gráfico N° 3 se evidencia que ChatGPT es la herramienta de IA más utilizada por los estudiantes encuestados,



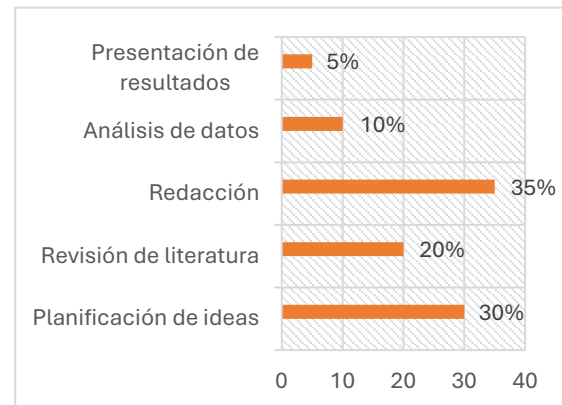
con un 49% de preferencia, lo que subraya su popularidad y posiblemente su accesibilidad y versatilidad en la

realización de investigaciones académicas. Gemini es utilizada por un 25% de los estudiantes, lo que indica una presencia significativa, aunque menor. Poe y Claude son menos comunes, con un 8% y 7% de uso respectivamente, sugiriendo que son menos conocidas o menos útiles para las necesidades de los estudiantes. Finalmente, Aithor es la menos utilizada, con solo un 5% de preferencia, lo que podría señalar una menor adopción o relevancia en comparación con otras herramientas de IA.

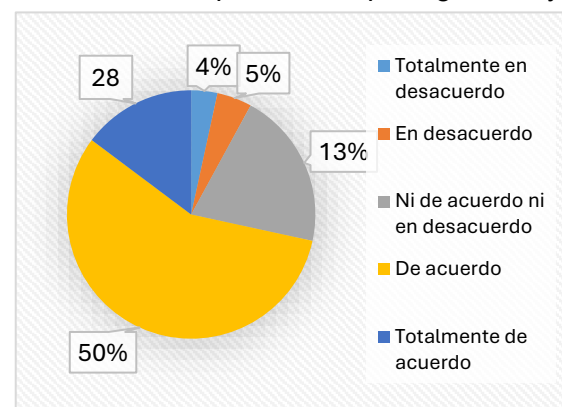
Gráfico N° 4. Empleo de manera habitual herramientas de IA

El Gráfico N° 4 revela que un 78% de los estudiantes encuestados utiliza de manera habitual herramientas de IA en sus investigaciones académicas, 13% de los estudiantes se muestra neutral, lo que podría sugerir que las utilizan solo ocasionalmente o que no están seguros de considerarlas parte de su práctica regular, mientras que 9% afirma que no emplea habitualmente estas herramientas, lo que indica que aún no ha incorporado IA en su trabajo académico.

Gráfico N° 5. Empleo herramientas de IA en las fases de investigación



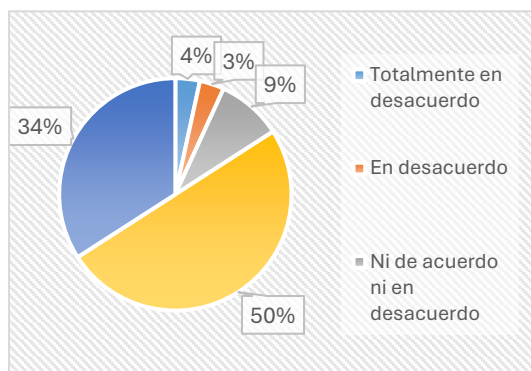
En el Gráfico N° 5 muestra cómo los estudiantes utilizan las herramientas de IA en distintas fases de sus investigaciones académicas. La fase de planificación de ideas es la más común, con un 30% de los estudiantes empleando IA para generar y



organizar sus ideas, lo que sugiere que estas herramientas son vistas como un recurso valioso en la etapa de definición de la idea de investigación. La redacción es otra fase destacada, 35% de los estudiantes utilizan IA para apoyar la escritura de sus trabajos. El análisis de datos sugiere que muchos estudiantes adoptan herramientas de IA, aunque en menor proporción, lo que revela una

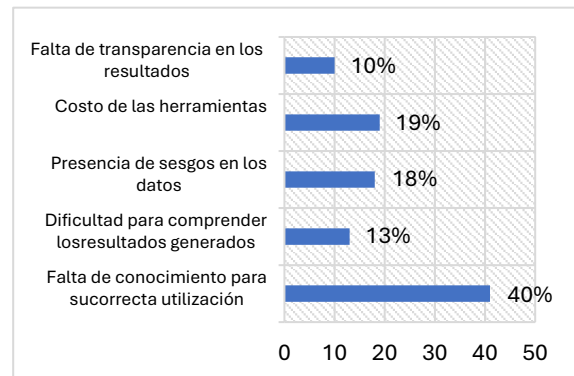
mayor necesidad de conocimiento y quizás se requiera incorporar e introducir a los estudiantes en el uso de las herramientas de data science como R, Power BI, Data Analytics AI y otros. Un dato preocupante es el uso para la revisión de literatura, solo 20% de los estudiantes están utilizando IA para esta tarea, y la presentación de resultados es la menos apoyada por estas herramientas, con solo un 5% de uso.

Gráfico N° 6. El uso de herramientas de IA ha mejorado la calidad de mis trabajos de investigación



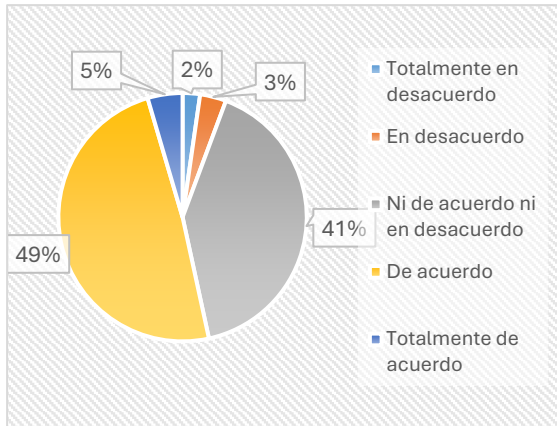
El gráfico N° 6 muestra que un 84% de los estudiantes cree que el uso de herramientas de IA ha mejorado la calidad de sus trabajos de investigación, lo que sugiere que estas herramientas son percibidas como beneficiosas para la calidad académica. Un 9% se encuentra en una posición neutral, lo que podría indicar que no han notado un impacto significativo o aún están evaluando su efectividad. Por otro lado, 7% no percibe una mejora en la calidad de sus trabajos.

Gráfico N° 7. Dificultades con el uso de herramientas de IA



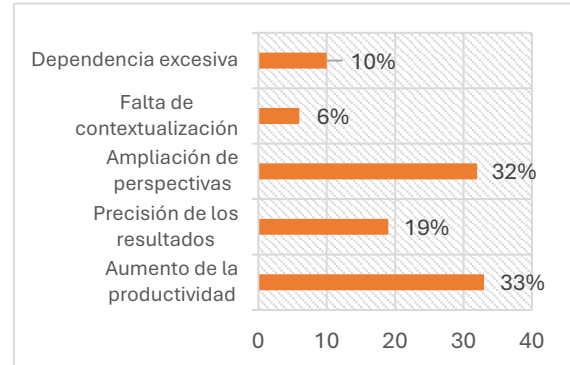
El gráfico N° 7 revela que el principal desafío con el uso de herramientas de IA en la investigación académica es la falta de conocimiento para su correcta utilización, reportada por el 40% de los estudiantes, lo que indica una necesidad de capacitación y formación. La dificultad para comprender los resultados generados afecta al 13% de los encuestados, sugiriendo que algunos estudiantes tienen problemas para interpretar la información proporcionada por estas herramientas. El 19% menciona el costo de la herramienta mientras que 18% considera que las herramientas presentan sesgos y 10% menciona la falta de transparencia como barrera para su uso.

Gráfico N° 8. Confianza en los resultados obtenidos a través de IA



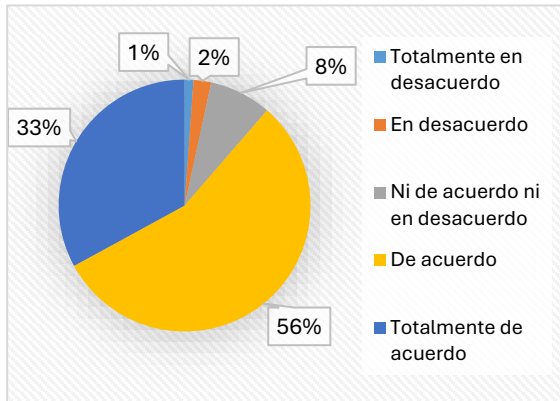
El gráfico N° 8 evidencia que el 54% de los estudiantes confía en mayor medida en los resultados obtenidos a través de las herramientas de IA, lo que sugiere una percepción positiva sobre la fiabilidad de estas herramientas en el contexto académico. Otra proporción del 41% se encuentra en una posición neutral, lo que podría reflejar una falta de experiencia suficiente para formar una opinión definitiva sobre la precisión de los resultados. Por otro lado, un 5% (no confía en los resultados generados por las herramientas de IA).

Gráfico N° 9. Beneficios del uso de la IA en investigación académica



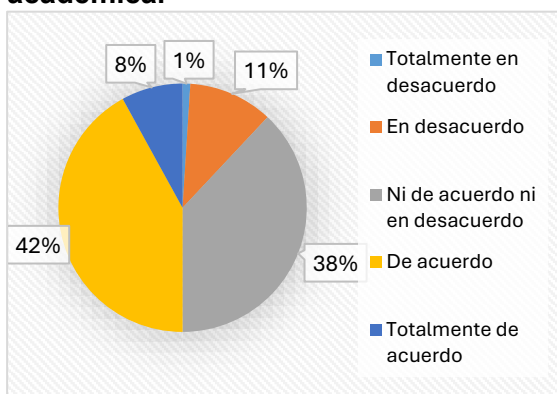
El gráfico N° 9 revela que 33% de los estudiantes perciben que el aprovechamiento de las herramientas de IA en la investigación académica facilita principalmente el aumento de la productividad, 32% considera que estas herramientas amplían las perspectivas de la investigación, proporcionando nuevas ideas y enfoques. La precisión de los resultados es apreciada por un 19% de los encuestados, lo que indica que estas herramientas también contribuyen a mejorar la exactitud de los datos. Sin embargo, un 16% de los estudiantes está preocupado por una posible dependencia excesiva de la IA y la falta de contextualización como un problema.

Gráfico N° 10. Recomiendo el uso de herramientas de IA



La mayoría de los estudiantes encuestados recomienda el uso de herramientas de IA. Esto sugiere un alto nivel de confianza y satisfacción con estas herramientas en el ámbito académico. Solo 8% se mantiene neutral, posiblemente reflejando una falta de experiencia o una postura indecisa. En contraste, solo un 3% no recomienda el uso de herramientas de IA, quizás por desconocimiento o inseguridad al respecto.

Gráfico N° 11. El uso de IA potencia la originalidad en la investigación académica.



En el gráfico N° 11 muestra que la mitad

de los estudiantes cree que el uso de herramientas de IA potencia la originalidad en la investigación académica, sugiriendo que estas herramientas pueden fomentar nuevas ideas y enfoques innovadores. Sin embargo, 38% se mantiene neutral, lo que podría reflejar una percepción ambigua o una falta de evidencia clara sobre cómo la IA impacta la originalidad. Por otro lado, 12% no considera que la IA contribuya a la originalidad, indicando preocupaciones sobre su capacidad para generar contenido verdaderamente innovador, quizás por falta de experiencia o desconfianza en la herramienta.

DISCUSIÓN

La investigación sobre el uso de herramientas de Inteligencia Artificial (IA) por los estudiantes de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas de la Universidad Nacional de Concepción ha permitido obtener información valiosa. Los resultados muestran que los estudiantes están informados sobre las herramientas de IA, y mayormente utilizan ChatGPT, confirmando su posición como la herramienta más popular entre los encuestados. Este hallazgo está en concordancia con López (2021), quien destaca que ChatGPT ha sido ampliamente adoptado por su capacidad para simplificar tareas complejas, como la generación de textos y la organización de ideas. Asimismo, Martínez (2022) señala

que, aunque existen múltiples herramientas disponibles, ChatGPT es percibido como más accesible y fácil de usar, lo que coincide con el predominio observado en esta investigación. Sin embargo, la menor utilización de otras herramientas sugiere una concentración en un número limitado de plataformas. Este resultado contrasta con lo expuesto por Vera (2023), quien argumenta que la diversificación en el uso de herramientas podría ser beneficiosa, ya que diferentes IA están diseñadas para funciones específicas que pueden mejorar áreas distintas del proceso de investigación. La falta de adopción de estas alternativas puede indicar un área de mejora en la capacitación tecnológica de los estudiantes.

En cuanto a los beneficios, los estudiantes consideran que el uso de herramientas de IA ha mejorado la calidad de sus trabajos académicos, destacando el aumento en productividad y aporte de nuevas perspectivas. Este resultado está alineado con las conclusiones de Smith (2022), quien enfatiza que la IA permite procesar grandes volúmenes de información en tiempos reducidos, optimizando el flujo de trabajo de los investigadores. De igual manera, Baker (2021) sostiene que la IA contribuye a una mayor precisión en los análisis y a la estructuración de ideas, lo que se refleja en el uso significativo de IA

para la planificación de ideas y la redacción de trabajos.

No obstante, existen aún estudiantes que aluden a la falta de conocimiento como un obstáculo importante para el uso eficiente de las herramientas de IA. Este hallazgo es congruente con Martínez (2022), quien identifica la falta de formación como una barrera crítica que impide a los usuarios aprovechar el potencial completo de la IA. Por otro lado, O'Neil (2016) advierte sobre el riesgo de depender en exceso de estas tecnologías, lo que podría desincentivar el desarrollo de habilidades analíticas propias. Estos autores sugieren que, aunque los beneficios son claros, es esencial que los estudiantes reciban la capacitación adecuada para maximizar su efectividad sin comprometer el desarrollo de habilidades fundamentales.

En términos éticos, los estudiantes consideran que la transparencia es crucial en el uso de herramientas de IA. Este resultado concuerda con las reflexiones de Binns (2018), quien subraya la necesidad de transparencia en los algoritmos para evitar decisiones automatizadas que carezcan de explicaciones claras. Asimismo, O'Neil (2016) resalta el riesgo de que la opacidad en los procesos de IA afecte la confianza en los resultados obtenidos, lo que puede tener implicaciones éticas en el contexto académico. Por otro lado, Vera (2023),

señala que la IA, aunque facilita la creación de contenido, también plantea interrogantes sobre la originalidad y la posible automatización de ideas sin la suficiente reflexión crítica. Binns (2018) agrega que, si no se gestionan adecuadamente, las herramientas de IA podrían contribuir a la falta de originalidad, al producir respuestas genéricas que carezcan de una profunda individualización en los trabajos académicos.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que, si bien las herramientas de IA aportan importantes beneficios en la investigación académica, aún existen desafíos éticos y formativos que deben abordarse. La literatura respalda en gran medida estos hallazgos, destacando la necesidad de promover un uso informado y responsable de la IA entre los estudiantes, estos reconocen el valor de las herramientas de IA por su capacidad para mejorar la calidad y eficiencia de la investigación académica. Sin embargo, también existe una preocupación significativa por las implicaciones éticas, particularmente en lo que respecta a la privacidad y la transparencia. Para optimizar el uso de la IA en la investigación, es fundamental equilibrar la adopción de estas herramientas con prácticas rigurosas de validación y un compromiso ético claro.

REFERENCIAS

- Binns, R., Veale, M., Van Kleek, M., & Shadbolt, N. (2018). The role of AI in the research process: Challenges and opportunities. *Journal of AI Research*, 61(1), 105-123.
- Floridi, L., & Cowls, J. (2019). *The ethics of artificial intelligence: A comprehensive introduction*. Oxford University Press.
- López, A. (2023). *El impacto de la inteligencia artificial en la productividad académica de los estudiantes de grado de la FCEA* [Tesis de maestría, Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Universidad Nacional de Concepción]. Repositorio Institucional de la FCEA. [Enlace a la publicación si está disponible]
- Miller, T., Howe, P., & Sonenberg, L. (2022). Productivity and creativity in the age of AI. *Cambridge Journal of AI Studies*, 45(2), 98-115. <https://doi.org/10.1234/cjas.2022.4567>
- Nakamura, J. (2023). Hallucination and repetition in AI language models. *Journal of Computational Intelligence*, 54(4), 415-430. <https://doi.org/10.1234/jci.2023.5432>

- Pope, C. (2020). Ethical considerations in the use of artificial intelligence. *Ethics in AI Review*, 34(3), 233-245.
<https://doi.org/10.1234/eaireview.2020.0.3456>
- Rodríguez, P. (2018). *Inteligencia artificial: Cómo cambiará el mundo (y tu vida)*. Titivillus.
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of innovations* (5th ed.). Free Press.
- Russell, S. J., & Norvig, P. (2004). *Artificial intelligence: A modern approach* (2nd ed.). Pearson Education S.A.
- UNESCO. (2023). *La inteligencia artificial en la educación*.
<https://www.unesco.org/es/digital-education/artificial-intelligence>
- UNESCO. (2024). *Informe sobre inteligencia artificial*.
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000389227>
- Vega, M. (2023, November 27). Generative artificial intelligence and scientific research. *ResearchGate*.
https://www.researchgate.net/publication/376202660_Inteligencia_Artificial_Generativa_e_Investigacion_Cientifica
-

31.- Tecnologías de la Información y Comunicación

Comparativa de algoritmos de cifrado simétrico aplicados a imágenes

Autor: Origlia, Pablo Daniel; pablo.origlia@estudiantes.unahur.edu.ar

Orientadora: Rey, Andrea Alejandra; andrea.rey@unahur.edu.ar

Universidad Nacional de Hurlingham (UNAHUR), Laboratorio de Investigación y Desarrollo Experimental en Computación (LIDEC)

Resumen

La Criptografía es la disciplina que estudia procesos para codificar y decodificar información para que sólo personas autorizadas puedan operar sobre el mensaje para transmitirlo y sean capaces de recibirlo de manera comprensible. Diversas técnicas de encriptación se han utilizado a lo largo de la historia y continúan empleándose en la actualidad, abarcando cada vez más campos de aplicación. Existe un gran número de algoritmos disponibles que varían en complejidad y seguridad, dependiendo del tipo de comunicación y la sensibilidad de la información que va a ser compartida. En este trabajo se analizan algoritmos de cifrado simétrico aplicados a imágenes en escala de grises. Se evalúan cifrados por bloques —AES, ARC2, Blowfish, CAST, DES, 3DES— y cifrados por flujo —ARC4, Salsa20 y ChaCha20—, a través de métricas como tiempo de ejecución, uso de memoria, uso de CPU, entropía, desviación máxima, desviación irregular, desviación respecto del histograma uniforme, correlación, tasa de cambio del número de píxeles, intensidad promedio de cambio unificada y relación señal-ruido pico. La metodología incluye un *pipeline* automatizado que realiza la conversión a escala de grises, recortes proporcionales, cifrado con modificación controlada de píxeles y generación de gráficas de los resultados. Se desarrollan *scripts* en Python, buscando precisión en la medición del uso de recursos computacionales y robustez criptográfica. Los resultados evidencian un compromiso entre eficiencia y seguridad en algunos algoritmos, como 3DES o ARC2 mientras que AES y ARC4 se destacan en velocidad o bajo consumo de recursos. El estudio contribuye a identificar el algoritmo óptimo según el escenario de uso.

Palabras clave: cifrado simétrico, imágenes en escala de grises, métricas criptográficas.

Introducción

En el contexto de la criptografía aplicada a imágenes digitales, el análisis de métricas representa un componente esencial para validar la robustez, seguridad y eficiencia de los algoritmos utilizados. A diferencia del texto, las imágenes poseen características particulares, como la alta redundancia espacial, el gran tamaño y la correlación entre píxeles adyacentes, que desafían los paradigmas tradicionales de cifrado. Por ello, evaluar algoritmos sin recurrir a métricas específicas comprometería su aplicabilidad real, especialmente en entornos donde la confidencialidad visual es crítica.

Una de las razones primordiales para implementar métricas de evaluación es la necesidad de demostrar resistencia frente a ataques estadísticos, diferenciales y por análisis visual. Como ejemplo, la correlación entre píxeles adyacentes en imágenes cifradas debe tender a cero, indicando que el algoritmo ha roto satisfactoriamente la estructura original (Alghamdi & Munir, 2024). Asimismo, métricas como la entropía permiten cuantificar el nivel de aleatoriedad en la imagen cifrada (Shannon, 1948), valores cercanos al máximo teórico sugieren una distribución uniforme de la información, dificultando los ataques por análisis de patrones.

La evaluación de la calidad visual en esquemas de cifrado de imágenes no se limita únicamente a criterios de seguridad, sino que también considera el grado de alteración visual introducido por el proceso de cifrado. En este sentido, métricas como el error cuadrático medio (MSE) y la relación señal-ruido pico (PSNR) permiten cuantificar las diferencias entre la imagen original y la cifrada (Ahmad & Ahmed, 2012). Así, un valor bajo de PSNR indica una transformación significativa en valores de los píxeles, lo que sugiere una alta efectividad del cifrado al generar una imagen cifrada visualmente irreconocible respecto al original, reforzando así la confidencialidad frente a inspecciones visuales o ataques estadísticos.

El cifrado de imágenes en entornos reales debe tolerar pérdidas de datos, ruido y distorsión durante la transmisión. Para ello, se aplican métricas como tasa de cambio del número de píxeles (NPCR) y la intensidad promedio de cambio unificada (UACI), que evalúan la sensibilidad del algoritmo ante pequeñas variaciones en la imagen o en la clave. Un alto valor de NPCR y de UACI indican que, incluso un solo píxel modificado genera diferencias significativas en la imagen cifrada, fortaleciendo el efecto avalancha (Wu et al., 2011).

Propiedades como la homogeneidad, el contraste y la energía reflejan la presencia de

patrones visuales estructurados en una imagen. En el contexto del cifrado digital, la persistencia de estas características tras el proceso de cifrado puede facilitar la extracción de información semántica por parte de un atacante. Por ello, un esquema de cifrado robusto debe reducir al mínimo estas métricas, favoreciendo una distribución aleatoria de los valores de píxel. Esta estrategia está directamente relacionada con la resistencia frente a análisis estadísticos como la entropía de Shannon y la inspección de histogramas, técnicas comúnmente empleadas en ataques de tipo estadístico y diferencial (Alghamdi & Munir, 2024).

En escenarios con restricciones de cómputo, como dispositivos embebidos o sistemas limitados, la eficiencia de los procesos de cifrado y descifrado resulta determinante (Alghamdi & Munir, 2024). La evaluación de algoritmos de cifrado de imágenes debe considerar métricas de rendimiento como el tiempo de ejecución y la complejidad computacional, además de los indicadores de seguridad sin comprometer los niveles de confusión y difusión (Shannon, 1949) que deben conformar los algoritmos.

La seguridad de un cifrado no sólo depende de su estructura matemática, sino también de su resistencia frente a intentos de análisis exhaustivo. En este sentido, la sensibilidad a la clave constituye un criterio fundamental: un

sistema robusto debe producir criptogramas completamente distintos ante variaciones mínimas en la clave utilizada (Shannon, 1948). Esta propiedad garantiza que el espacio de claves sea suficientemente amplio y que la probabilidad de éxito de un ataque por fuerza bruta sea despreciable. Shannon demuestra que, para alcanzar el ideal de “secreto perfecto”, el número de claves posibles debe ser al menos igual al número de mensajes posibles.

Objetivos

En este trabajo se pretende analizar comparativamente diversos algoritmos de cifrado simétrico aplicados a imágenes digitales, evaluando su desempeño tanto desde la eficiencia computacional como desde la robustez frente a ataques criptográficos. La experimentación se realiza sobre imágenes en escala de grises, considerando algoritmos representativos de cifrado por bloque como por flujo.

Un aspecto clave del estudio es la evaluación de la seguridad del cifrado en el contexto específico de imágenes digitales, considerando los siguientes tipos de ataques.

Ataques estadísticos: Intentan explotar patrones residuales en la imagen cifrada (como correlaciones entre píxeles o distribuciones no uniformes), frente a los cuales métricas como la entropía de Shannon

y la correlación entre píxeles, permiten estimar el grado de aleatoriedad introducido por el cifrado.

Ataques diferenciales: Analizan la sensibilidad del cifrado frente a mínimas alteraciones en la imagen original, evaluados mediante métricas como UACI y NPCR, fundamentales para determinar la capacidad de un algoritmo de dispersar pequeñas variaciones.

Ataques por análisis visual: Buscan identificar estructuras o patrones perceptibles en la imagen cifrada. En este caso, métricas como la desviación máxima, la irregularidad de intensidades y el PSNR permiten detectar si el cifrado deja rastros visuales aprovechables por un atacante.

Ataques de criptoanálisis por fuerza bruta o análisis de complejidad: Donde se consideran factores como uso de memoria, tiempo de ejecución y carga de CPU, para estimar si el cifrado es viable en entornos de recursos limitados y si su complejidad impide ataques masivos por enumeración.

A través de este enfoque, se busca determinar qué esquemas de cifrado son más adecuados en función del contexto de aplicación, contrastando seguridad y eficiencia. Esto permite identificar algoritmos óptimos para distintos escenarios, como transmisión de imágenes en redes inseguras, almacenamiento confidencial o sistemas de

vigilancia, donde las restricciones de tiempo, recursos o nivel de protección varían considerablemente.

Materiales y métodos

Los algoritmos a estudiar y su implementación se encuentran disponibles en el módulo en Python `pycryptodome`, el cual proporciona primitivas criptográficas de bajo nivel (<https://pypi.org/project/pycryptodome/>). A continuación, se incluye una breve descripción de las características principales de cada uno de ellos.

Advanced Encryption Standard, AES: Algoritmo de cifrado por bloques basado en sustitución-permutación, con claves de 128, 192 o 256 *bits* (NIST, 2001), el cual resulta rápido, seguro, ampliamente adoptado y resistente a ataques conocidos como diferencial y lineal (Daemen & Rijmen, 2002). Su única desventaja potencial es el alto uso computacional en *hardware* limitado.

Alleged Rivest Cipher 2, ARC2: Cifrado por bloques de 64 *bits* con clave variable (hasta 128 *bits*), diseñado para ser un reemplazo de *Data Encryption Standard* (Kaliski, 1998). Este algoritmo es rápido en *software*, pero menos seguro ante criptoanálisis moderno (Schneier, 1996), por lo que ya no se recomienda para nuevas implementaciones.

Alleged Rivest Cipher 4, ARC4: Cifrado de flujo con clave variable (Fluhrer et al., 2001) que fue ampliamente usado en SSL (*Secure Sockets Layer*), TLS (*Transport Layer Security*) y WEP (*Wired Equivalent Privacy*) por su velocidad. Sin embargo, tiene debilidades significativas como sesgos en la salida de la secuencia de *bits* generada (Popov, 2015), y ha sido oficialmente desaconsejado.

Blowfish: Cifrado por bloques de 64 *bits* con clave de hasta 448 *bits* el cual ofrece buena velocidad y resistencia ante ataques conocidos (Schneier, 1996). Su principal limitación es el tamaño de bloque, que puede ser inseguro en ciertos contextos modernos (Schneier, 1993).

Carlisle Adams and Stafford Tavares, CAST: Cifrado por bloques basado en red Feistel, para el cual existen dos variantes: CAST-128 que usa bloques de 64 *bits* y claves de 40–128 *bits*, y CAST-256 que usa bloques de 128 *bits* y claves de hasta 256 *bits*. Este algoritmo es seguro, eficiente y libre de regalías. Sin embargo, presenta menor seguridad comparado con AES y es menos adoptado globalmente. El mismo ofrece buena resistencia a ataques tanto diferencial como lineal (Menezes et al., 1997) a pesar de tener limitaciones de seguridad para claves más cortas (Adams, 1997).

Chacha20: Cifrado de flujo moderno, diseñado como mejora de Salsa20 y que usa una clave de 256 *bits* y nonce (*number used once*) de 96 *bits* que se utiliza al inicio del proceso para prevenir ataques de repetición con mensajes interceptados antiguos y ganar accesos no autorizados. Este método es muy rápido, seguro, resistente a ataques e ideal para dispositivos móviles. El mismo ha sido adoptado en TLS y SSH (*Secure Shell*) (Bernstein et al., 2008) a pesar de tener menos soporte *hardware* que AES y menor difusión en sistemas *legacy*.

Data Encryption Standard, DES: Este cifrado por bloques de 64 *bits* con clave de 56 *bits* fue estándar durante décadas. Si bien es rápido en *hardware* (NIST, 1977) y posee una clave corta vulnerable a fuerza bruta y diferencial (Biham & Shamir, 1991), resulta obsoleto frente a AES.

Triple DES, 3DES: Aplica DES tres veces con claves independientes, mejorando la seguridad de DES pero con mayor costo computacional (Schneier, 1996). Este método es compatible con sistemas DES, siendo más seguro que DES. Debido a que es lento y vulnerable a ataques como *meet-in-the-middle* (NIST, 2017), ha sido reemplazado por AES.

Salsa20: Cifrado de flujo rápido y seguro, diseñado por Daniel J. Bernstein, que usa

clave de 128 o 256 *bits* y nonce de 64 *bits* (Bernstein, 2008). Esta técnica es de alta velocidad, resistente a ataques y posee un diseño simple, con menor difusión que AES.

En lo que sigue, se describen las métricas utilizadas en este estudio, para evaluar la calidad de encriptación de imágenes en escala de grises. Estas métricas ayudan a cuantificar el grado de diferencia entre una imagen original P y su versión cifrada C , bajo diferentes criterios, lo cual es crucial para garantizar la seguridad y aleatoriedad visual del proceso criptográfico.

En lo que sigue P y C denotarán imágenes de tamaño $M \times N$, donde M indica el alto y N el ancho. De esta manera, $P(x, y)$ y $C(x, y)$ denotan el valor del píxel en la posición (x, y) de las imágenes P y C , respectivamente. A modo ilustrativo, en la Figura 1, se muestra una imagen junto con la imagen encriptada aplicando el método AES.



Figura 1: Imagen original P (arriba) e imagen encriptada C (abajo).

Coefficiente de Correlación entre dos imágenes: Evalúa cuánto se parecen los valores del mismo píxel en la imagen original contra el de la imagen encriptada. En imágenes similares suele ser alto, mientras que en imágenes cifradas debe acercarse a 0. El coeficiente de correlación está definido como

$$CC = \frac{Cov(P,C)}{\sigma_P \sigma_C},$$

donde σ_P y σ_C son los desvíos estándar de los valores de los pixeles de P y C , respectivamente, y la covarianza se define como

$$Cov(P, C) = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (P(x, y) - \bar{P})(C(x, y) - \bar{C}),$$

donde P^- y C^- representan las medias de los valores de los píxeles en las imágenes P y C , respectivamente.

Si el valor de CC es próximo a cero, el esquema logra romper la estructura visual de la imagen, dificultando ataques estadísticos.

Desviación máxima: Se utiliza para medir la diferencia entre los histogramas de la imagen original H_p y de la imagen cifrada H_c . El histograma de una imagen representa la distribución de intensidades de píxeles, y un buen cifrado debería alterar esa distribución de forma significativa.

Esta métrica se basa en la diferencia absoluta entre los valores del histograma de ambas imágenes; es decir,

$$d_i = |H_p(i) - H_c(i)|,$$

para $i = 0, 1, \dots, 255$. Luego, se suman dichas diferencias para obtener una medida global, dada por

$$D = \frac{d_0 + d_{255}}{2} + \sum_{i=1}^{254} d_i.$$

Si el histograma de la imagen cifrada es muy similar al de la imagen original, el valor de D es bajo, lo cual puede indicar que el cifrado no fue eficaz. En cambio, un valor alto de esta métrica indica que el histograma cambia significativamente, lo cual sugiere una

transformación más fuerte y, por lo tanto, una mejor ocultación del contenido original.

Desviación irregular: Analiza el histograma de la imagen diferencia $P - C$, que se obtiene píxel por píxel. El histograma resultante está dado por $H = (h_0, h_1, \dots, h_{255})$, donde h_i representa la frecuencia relativa del nivel de gris i en la imagen $P - C$, para $i = 0, 1, \dots, 255$.

Esta métrica calcula la desviación total entre cada valor del histograma de diferencias y su media, dada por

$$H_{D_i} = |h_i - H^-|,$$

donde $H^- = \sum_{i=0}^{255} h_i / 256$.

Cuanto menor es el valor de la suma

$$I_D = \sum_{i=0}^{255} H_{D_i},$$

más uniforme es la distribución, lo cual es deseable ya que indica que los valores de diferencia no siguen un patrón reconocible. Por lo tanto, un valor de I_D bajo indica que el algoritmo de cifrado produjo una imagen cifrada cuya diferencia con la original es altamente aleatoria, dificultando así la predicción o análisis visual.

Desviación respecto del histograma uniforme: Evalúa qué tan uniforme es el histograma de

la imagen cifrada por sí sola, sin comparación directa con la imagen original. Idealmente, una imagen cifrada debería tener una distribución de niveles de gris completamente uniforme para maximizar la entropía y reducir la redundancia visual.

Para calcularla primero se obtiene el valor ideal uniforme, que depende del tamaño de la imagen, y está dado por

$$H_u(i) = \left\{ \frac{MN}{256} \quad 0 \leq i \leq 255, \quad 0 \text{ en otro caso.} \right.$$

Luego, se compara con cada valor de intensidad del histograma, sumando todas las desviaciones absolutas. Finalmente, se normaliza con respecto al tamaño total de la imagen, obteniendo

$$D_p = \sum_{i=0}^{255} \frac{|H_c(i) - H_u(i)|}{MN}.$$

Un valor de D_p bajo indica que el histograma de la imagen cifrada se acerca considerablemente a una distribución uniforme, lo cual es una característica deseable en un cifrado robusto y de alta entropía.

Relación señal-ruido pico: Es una métrica común en procesamiento de imágenes que mide la relación entre la señal (imagen original) y el ruido (diferencia introducida por el cifrado) y se calcula como

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2 MN}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (P(x,y) - C(x,y))^2}.$$

Aunque tradicionalmente se usa para evaluar compresión con pérdida, también puede aplicarse para estimar qué tanto difiere una imagen cifrada de la original. El PSNR se basa en el cálculo del MSE entre las dos imágenes. A partir de este error, se estima cuántos decibelios de diferencia existen entre ambas. Cuanto mayor es el error, menor es el PSNR, lo que indica una diferencia mayor.

En el contexto del cifrado de imágenes, un valor de PSNR bajo es deseable, ya que significa que la imagen cifrada es muy distinta de la original. Si el PSNR es un valor grande, significa que no hay diferencia, lo cual es una falla grave en un algoritmo de cifrado.

Tasa de cambio del número de píxeles: En criptografía de imágenes, se utiliza para verificar la sensibilidad del algoritmo: al modificar mínimamente la imagen original, por ejemplo, un solo *bit*, cuantificando el porcentaje de píxeles que cambian entre dos imágenes del mismo tamaño. Se obtiene como

$$NPCR = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N D(x,y)}{MN} 100\%,$$

donde

$$D(x,y) = \{1 \text{ si } C_1(x,y) \neq C_2(x,y), \quad 0 \text{ en caso contrario,}$$

siendo C_1 y C_2 dos cifrados para la misma imagen P .

Un valor cercano al 100% indica una buena difusión, lo cual es fundamental para resistir ataques diferenciales. Cuantos más píxeles cambian, mejor es la aleatoriedad del sistema de cifrado.

Intensidad promedio de cambio unificada:

Mide el cambio promedio de intensidad entre dos imágenes cifradas derivadas de entradas ligeramente distintas, por ejemplo, el cambio en un píxel, y se calcula como

$$UACI = \frac{1}{MN} \left[\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \frac{|C_1(x,y) - C_2(x,y)|}{256} \right] 100\%,$$

donde C_1 y C_2 son dos cifrados para la misma imagen P .

Mientras que la NPCR evalúa qué tantos píxeles cambiaron, la UACI evalúa cuánto cambió la intensidad de los píxeles. Un valor cercano al 33% es considerado óptimo para imágenes de 8 bits. Un valor bajo puede indicar que el algoritmo no altera suficientemente la imagen y, por lo tanto, es predecible.

Entropía de Shannon: Cuantifica el nivel de aleatoriedad en los valores de píxeles de una imagen. Es una métrica fundamental para estimar la impredecibilidad de una imagen cifrada, obtenida como

$$S(P) = - \sum_{i=0}^{255} p_i \log_2(p_i),$$

donde $P = \{p_1, p_2, \dots, p_{255}\}$, indicando la probabilidad de aparición del valor de gris i por p_i . Si todos los valores tienen la misma probabilidad de ocurrencia; es decir, $p_i = 1/256$ para $i = 0, 1, \dots, 255$, la entropía alcanza su valor máximo.

Una imagen cifrada ideal debe tener una entropía cercana a 8 para imágenes en escala de grises de 8 bits. Un valor más bajo indica que algunos valores se repiten más que otros, lo cual puede ser un problema de seguridad.

Tiempo de ejecución: Se registró el tiempo necesario para cifrar cada una de las imágenes de los distintos tamaños y variantes considerados en este trabajo. Este tiempo refleja la eficiencia computacional, donde tiempos bajos son preferibles para aplicaciones en tiempo real o recursos limitados. Mediante módulos propios de Python se mide con exactitud el tiempo en el instante previo y posterior del procesamiento del algoritmo y luego, a través de la diferencia, se obtiene el tiempo necesario para ejecutar cada uno de los algoritmos evaluados.

Uso de memoria (Memory Consumption): Se cuantificó la memoria utilizada por el proceso durante la ejecución del algoritmo específico, rastreando el consumo de memoria desde el

inicio de la ejecución hasta su finalización, registrando tanto el uso actual como el pico máximo alcanzado. Esto permitió evaluar no solo el consumo promedio, sino también los momentos de mayor demanda de memoria por parte del proceso, lo cual resulta especialmente relevante en entornos con recursos limitados como dispositivos embebidos o móviles.

Carga de CPU: Se midió el tiempo de CPU consumido por el proceso de encriptación específico, ignorando las pausas por espera en la escritura/lectura en memoria, bloqueos o inactividad. Esto lo hace ideal para evaluar el coste computacional puro de un algoritmo, sin que factores externos distorsionen la medición. A diferencia de otros enfoques evaluados, éste ofrece una métrica más precisa y consistente para comparar el rendimiento real de código intensivo en CPU, facilitando análisis reproducibles y eliminando el ruido introducido por las condiciones del sistema o la carga de trabajo concurrente.

Hardware utilizado: Las pruebas experimentales fueron realizadas en un entorno virtual sobre un equipo portátil. El procesamiento se llevó a cabo utilizando un microprocesador CPU Intel Core de octava generación (i7-8550U), el sistema dispone de 8 GB de memoria RAM DDR4, un almacenamiento de estado sólido SSD M.2 NVMe con capacidad de 256 GB, operando

bajo sistema operativo Windows 11, compatible con las bibliotecas utilizadas (OpenCV y NumPy, entre otras) y suficiente para ejecutar los *scripts* en Python sin restricciones de compatibilidad.

Preprocesamiento de las imágenes de prueba:

Para el ensayo se empleó un conjunto de 145 imágenes iniciales con tamaños del orden de los 6000×4000 píxeles, tanto en color como en escala de grises, las cuales se encuentran disponibles en <https://www.pexels.com/>. En la etapa de preprocesamiento, todas las imágenes fueron convertidas a escala de grises y, tomando como referencia la imagen de menor tamaño (5984×4000 píxeles), se recortaron las restantes para homogeneizar sus dimensiones. Adicionalmente, se impuso que el número total de píxeles de cada imagen fuera múltiplo de 32 *bytes*, con el fin de evitar operaciones de *padding* y *unpadding* requeridas por ciertos algoritmos, asegurando así un tratamiento uniforme y comparaciones más precisas.

A partir de este tamaño común; es decir, con escala 1:1, se generaron recortes centrados que preservan la estructura visual principal, evitando favorecer regiones periféricas. Para analizar el comportamiento de los algoritmos ante distintas dimensiones de archivo, se crearon versiones recortadas que representan el 75%, 66%, 50%, 33% y 25% del tamaño

original; es decir, escalas de 3: 4, 2: 3, 1: 2, 1: 3 y 1: 4, respectivamente.

Por último, para la evaluación de determinadas métricas, se generó una variante de cada imagen en la que se modifica aleatoriamente el valor de un píxel seleccionado al azar. Este procedimiento se llevó a cabo con el objetivo de simular perturbaciones puntuales y observar la respuesta de los algoritmos de cifrado ante este tipo de alteraciones. Así que por cada imagen original se generaron 12 imágenes en los seis tamaños indicados y cada una con su variante en un píxel aleatorio. De esta manera se conformó todo el conjunto de imágenes a procesar para su análisis posterior.

Procesamiento de las imágenes y cálculo de las métricas de calidad: Para el procesamiento de las imágenes y evitar los procesos de optimización por parte del intérprete de Python, se generó un orden de las imágenes donde se mezclaron aleatoriamente, el algoritmo a utilizar y la versión de la imagen a encriptar, tanto en tamaño, como en su versión con un píxel modificado. Finalmente, se almacenaron algunas de las mediciones realizadas obtenidas en el procesamiento de las imágenes. Adicionalmente, algunas de las métricas se realizan posprocesamiento, ya que el cálculo de ellas se realiza comparando la imagen original con la encriptada o bien entre dos imágenes encriptadas con una

pequeña perturbación en la imagen original. Vale destacar que de las 12 imágenes generadas en el preprocesamiento y junto con los 9 algoritmos bajo estudio se generaron un total de $(6 + 6) \cdot 9 = 108$ imágenes derivadas por cada imagen original, contabilizando un total de 15660 imágenes procesadas. Finalmente, se unificó en un solo archivo de métricas donde cada imagen procesada lleva asociada todas las métricas relacionadas.

Para el análisis de los datos se generaron diferentes gráficas que ayuden a evaluar las distintas características de cada uno de los algoritmos en base a el tamaño de la imagen, y las diferentes imágenes entre sí, las cuales se presentan en la próxima sección.

Resultados y discusión

La evaluación de los resultados se presenta mediante dos tipos de representaciones gráficas. En primer lugar, se emplean *boxplots* para agrupar y comparar los valores obtenidos según el algoritmo de cifrado utilizado. En segundo lugar, se utilizan gráficos de líneas que muestran la variación de las métricas en función del tamaño de archivo, diferenciando también por algoritmo.

En la Figura 2, se presentan los resultados correspondientes al coeficiente de correlación y se observa que todos los algoritmos evaluados alcanzan el valor esperado para dicha métrica, con una dispersión inferior al

0.15%, incluyendo *outliers*. Esto indica que, en todos los casos, se logra una adecuada difusión de la estructura visual de la imagen original, cumpliendo satisfactoriamente con el objetivo de eliminar patrones perceptibles en la misma.

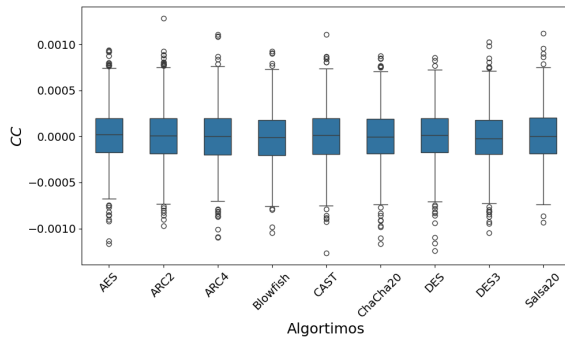


Figura 2: Coeficiente de correlación por algoritmo.

En la Figura 3 se muestra la variación de la desviación máxima entre las imágenes originales y las cifradas, observando una relación directa entre el tamaño de la imagen y el valor de esta métrica, alcanzando magnitudes del orden de 10^7 , lo que sugiere una elevada discrepancia entre la imagen original y la cifrada. Asimismo, independientemente del algoritmo de cifrado empleado, no se evidencia una superioridad significativa de ninguno en particular, dado que las curvas correspondientes a cada uno de los algoritmos evaluados se encuentran prácticamente superpuestas.

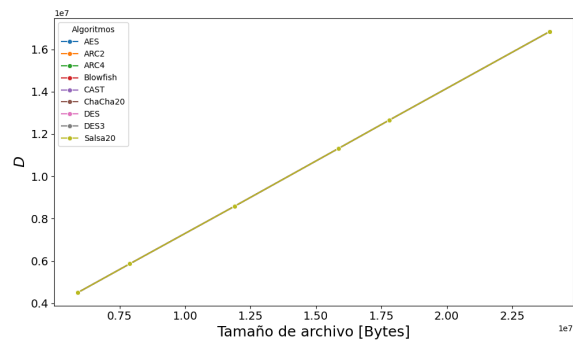


Figura 3: Desviación máxima en función del tamaño de imagen y por algoritmo.

En el caso de la desviación irregular, cuyos valores se muestran en la Figura 4, el valor medio para el conjunto de imágenes procesadas se sitúa en torno a 7×10^6 , sin evidenciar variabilidad significativa entre los algoritmos evaluados. Esta métrica, por lo tanto, no resulta discriminante para identificar un algoritmo con un desempeño superior respecto a los demás.

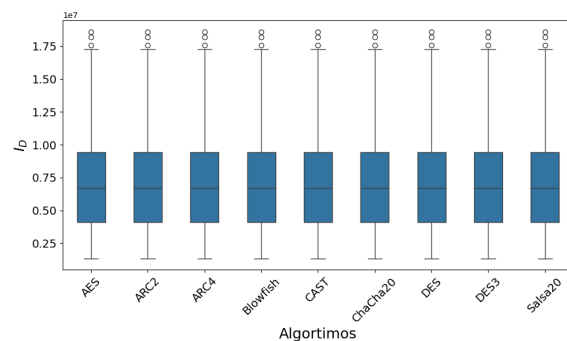


Figura 4: Desviación irregular por algoritmo.

Cuando se analiza la desviación respecto del histograma uniforme, tal cual se muestra en la Figura 5, al igual que lo observado para la Figura 3, las curvas se encuentran casi superpuestas no evidenciando una preferencia

en alguno de los algoritmos, pero con la particularidad que a medida que aumenta el tamaño de la imagen analizada se logra una mejora en esta métrica ya que la misma tiende a valores mínimos. Se podría decir, entonces, que a medida que aumenta el tamaño de la imagen, la información visual se distribuye más uniformemente en toda la imagen cifrada.

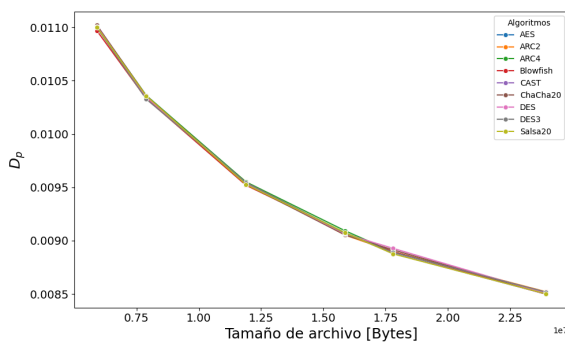


Figura 5: Desviación respecto del histograma uniforme en función del tamaño de imagen y por algoritmo.

En el análisis de los valores para PSNR, que se exhiben en la Figura 6, se concluye que no existe una variabilidad apreciable para cada uno de los algoritmos que se ponen a prueba en este trabajo de investigación. En la Figura 6, los valores de PSNR se sitúan en torno a 8dB para todos los algoritmos, sin variabilidad significativa. Este nivel corresponde al esperado al comparar imágenes estadísticamente independientes, confirmando que todos los algoritmos eliminan efectivamente la estructura visual original, aunque esta métrica no discrimina diferencias de desempeño entre ellos.

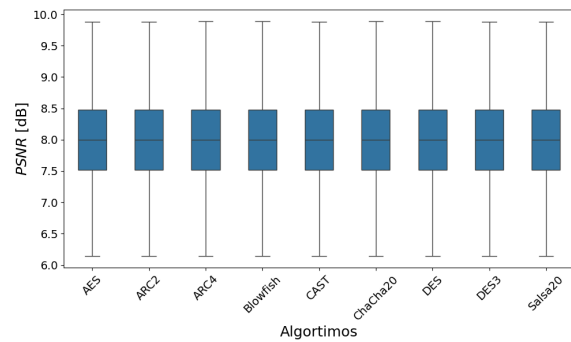


Figura 6: Relación señal-ruído pico por algoritmo.

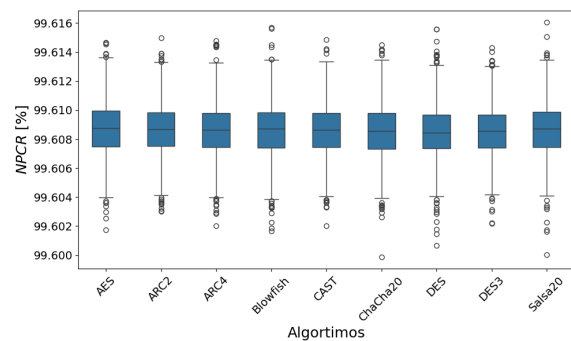


Figura 7: Tasa de cambio del número de píxeles por algoritmo.

El análisis de la tasa de cambio del número de píxeles, representada en la Figura 7, muestra que los resultados obtenidos son uniformes e independientes del algoritmo empleado. Esto indica que todos los diseños evaluados están orientados a que una pequeña perturbación en la imagen original genere diferencias significativas en la imagen cifrada, presentando una variación inferior al 0.014%.

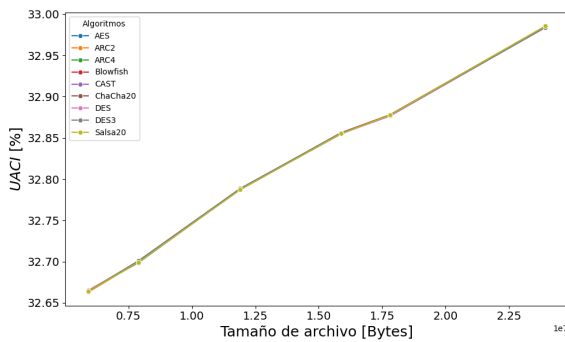


Figura 8: Intensidad promedio de cambio unificada en función del tamaño de imagen y por algoritmo.

Adicionalmente, en la Figura 8 se observa que el valor de UACI varía levemente con el tamaño de la imagen, en torno a un 0.25% entre los diferentes tamaños evaluados, permaneciendo todos cercanos al 33%. Este valor es considerado óptimo para imágenes en escala de grises de 8 *bits*, ya que garantiza que un pequeño cambio en la imagen original provoca una alteración significativa en la imagen cifrada.

De manera similar, el análisis de la entropía de Shannon que se presenta en la Figura 9, muestra que el valor de esta métrica varía únicamente de forma marginal con el tamaño de la imagen, mientras que no presenta diferencias significativas entre los algoritmos evaluados, ya que las curvas correspondientes se encuentran completamente superpuestas.

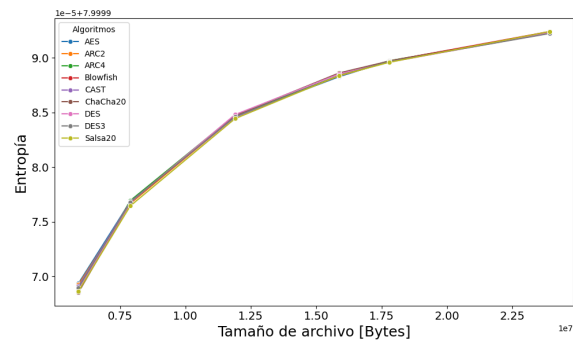


Figura 9: Entropía de Shannon en función del tamaño de imagen y por algoritmo.

El análisis conjunto de las métricas de tiempo de ejecución y carga de CPU, presentadas en las Figuras 10 y 11, respectivamente, evidencia una correlación directa entre ambas, ya que el uso de CPU y el tiempo de procesamiento están intrínsecamente relacionados en un entorno computacional. A partir de estas representaciones, se observa que los algoritmos con mayor demanda de recursos, tanto en tiempo como en carga de CPU, son 3DES y ARC2, cuyos valores se sitúan por encima de la media del conjunto evaluado. En contraste, los algoritmos con menor tiempo de ejecución fueron AES y ARC4, seguidos por ChaCha20 y Salsa20.

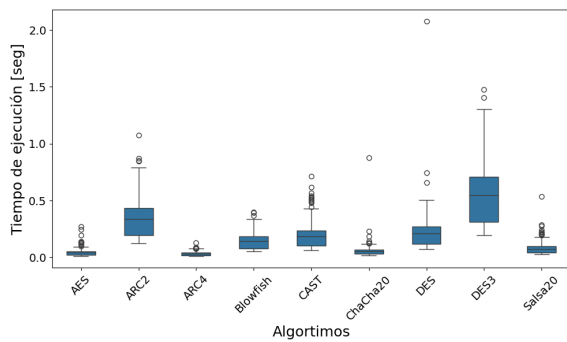


Figura 10: Tiempo de ejecución por algoritmo.

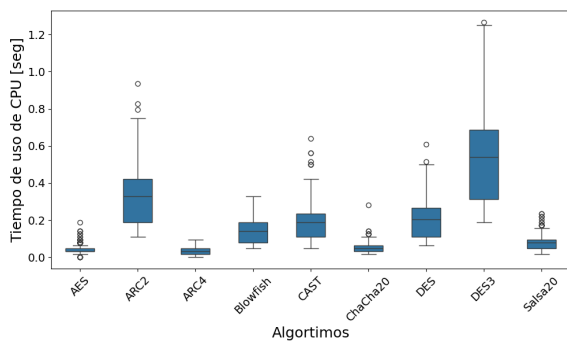


Figura 11: Carga de CPU por algoritmo.

Por último, en la Figura 12, que representa el uso de memoria del sistema, se observa que no existe variabilidad apreciable entre los diferentes algoritmos evaluados, independientemente del tamaño de las imágenes empleadas en el ensayo.

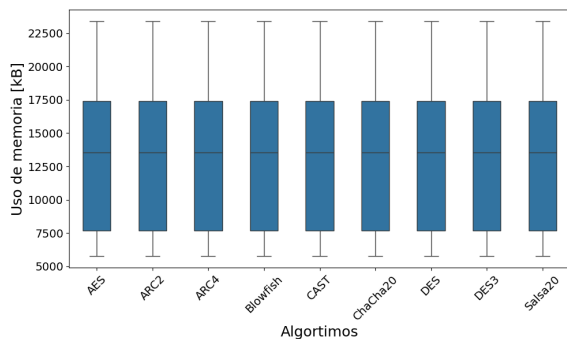


Figura 12: Uso de memoria por algoritmo.

Conclusiones

En este trabajo se estudió el rendimiento de nueve algoritmos criptográficos aplicados a imágenes en escala de grises. En base al análisis de las figuras generadas a partir de las mediciones realizadas y evaluando el desempeño de cada método a partir de cada una de las métricas propuestas en la metodología, se concluye que, en el caso del cifrado de imágenes en escala de grises de 8 bits, los algoritmos seleccionados cumplen los objetivos requeridos para su uso. En particular, permiten una transformación que distribuye efectivamente la estructura visual de la imagen original a lo largo de toda la imagen cifrada. Cabe destacar, además, que se identificó la mayor velocidad de procesamiento en los algoritmos AES y ARC4, así como la mayor carga de CPU en los algoritmos 3DES y ARC2.

El código desarrollado para la implementación de los algoritmos de encriptación, de las métricas de calidad descriptos en este trabajo, los *scripts* de pre o posprocesamiento, así como el conjunto completo de imágenes originales utilizadas en las pruebas, se encuentra disponible en un repositorio de GitHub, accesible desde <https://github.com/pablo-origlia/32jjiaugm>.

Bibliografía

- Adams, C. (1997). *The CAST-128 encryption algorithm*. IETF; RFC 2144.
- Ahmad, J., & Ahmed, F. (2012). Efficiency analysis and security evaluation of image encryption schemes. *International Journal of Video & Image Processing and Network Security (IJVIPNS-IJENS)*, 12(4), 18–29.
- Alghamdi, Y., & Munir, A. (2024). Image encryption algorithms: A survey of design and evaluation metrics. *Journal of Cybersecurity and Privacy*, 4, 126–152.
- Bernstein, D. J. et al. (2008). ChaCha, a variant of Salsa20. *Workshop Record of SASC*, 8, 3–5.
- Bernstein, D. J. (2008). The Salsa20 family of stream ciphers. In *New stream cipher designs: The eSTREAM finalists* (pp. 84–97). Springer.
- Biham, E., & Shamir, A. (1991). Differential cryptanalysis of DES-like cryptosystems. *Advances in Cryptology – CRYPTO'90*, 2–21.
- Daemen, J., & Rijmen, V. (2002). *The design of rijndael: AES—the advanced encryption standard*. Springer.
- Fluhrer, S., Mantin, I., & Shamir, A. (2001). Weaknesses in the key scheduling algorithm of RC4. *Selected Areas in Cryptography (SAC 2001)*, 1–24.
- Kaliski, B. (1998). *RC2 encryption algorithm*. IETF; RFC 2268.
- Menezes, A. J., Oorschot, P. C. van, & Vanstone, S. A. (1997). *Handbook of applied cryptography*. CRC Press.
- NIST. (1977). *Data encryption standard (DES)* (FIPS PUB 46). U.S. Department of Commerce.
- NIST. (2001). *Advanced encryption standard (AES)* (FIPS PUB 197). U.S. Department of Commerce.
- NIST. (2017). *Transitioning the use of cryptographic algorithms and key lengths* (NIST Special Publication 800-131A Rev. 2). U.S. Department of Commerce.
- Popov, A. (2015). *Prohibiting RC4 cipher suites*. IETF; RFC 7465.
- Schneier, B. (1993). Description of a new variable-length key, 64-bit block cipher (Blowfish). *Fast Software Encryption*, 809, 191–204.
- Schneier, B. (1996). *Applied cryptography: Protocols, algorithms, and source code in c* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423.
- Shannon, C. E. (1949). Communication theory of secrecy systems. *Bell System Technical Journal*, 28(4), 656–715. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1949.tb00928.x>
-

Wu, Y. et al. (2011). NPCR and UACI randomness tests for image encryption. *Cyber Journal of Multidisciplinary Sciences*, 1(2), 31–38.

Financiamiento

Este trabajo está financiado por la Secretaría de Investigación de la Universidad Nacional de Hurlingham (UNAHUR) y por el proyecto de investigación PIUNAU 80020240200003HU, Título: Análisis de Imágenes Satelitales SAR y Ópticas por medio de Aprendizaje Automático y Aprendizaje Profundo. Directora: Dra. Andrea Rey, Codirectora: Dra. Juliana Gambini.

26.- Ciencias e Ingeniería de Materiales

**"USO DE PARTÍCULAS DE CAUCHO RECICLADO EN LA ESTABILIZACIÓN DE
SUELOS PARA MITIGAR EL IMPACTO AMBIENTAL Y REDUCIR COSTOS
ESTRUCTURALES"**

Autor: Poma Ramos, Jonatan H.; jhnhpr07@gmail.com

Orientador: Bermejo Franco, Víctor E.; vicosue@yahoo.es

Universidad de origen / Facultad: Universidad Mayor de San Andrés / Facultad de Ingeniería

Resumen

El presente estudio se enfoca en el uso de partículas de caucho reciclado extraídas por la trituración de neumáticos usados, para la estabilización de suelos, con el objetivo de reducir el impacto ambiental y también de optimizar costos en la construcción de obras de contención. Se analizará cómo las partículas de caucho pueden mejorar la resistencia al corte, sus parámetros resistentes y la estabilidad del suelo, comparando el comportamiento de un muro de contención en voladizo diseñado con partículas de caucho reciclado frente a otro sin este material. A través de simulaciones en software geotécnico Fine GEO5 y datos obtenidos de ensayos de laboratorio con este material, según las normas ASTM D 3080 para el ensayo de Corte Directo; se analizará la eficacia del caucho en diferentes tipos de suelo, como ser arenosos arcillosos, para optimizar el rendimiento estructural.

El uso de caucho reciclado no solo ofrece una solución ambiental al reutilizar residuos que tardan siglos en degradarse, sino que también presenta ventajas económicas significativas, al utilizar este material para la estabilización frente a otros materiales más costosos como lo son la Cal y el Cemento. Las partículas de caucho mejoran las propiedades mecánicas del suelo, lo que reduciría los costos en la construcción de infraestructuras como en el caso de análisis que fue el diseño de un muro de contención en voladizo, donde se vio un ahorro significativo frente al diseño con suelo sin estabilizar usando partículas de caucho. Además, estas mejoras contribuyen a una construcción hoy en día más sostenible y económica, ofreciendo una alternativa viable y rentable en el campo de la ingeniería civil.

Palabras clave: Estabilización de suelos, Muros de contención, caucho reciclado, impacto ambiental, costos de construcción, simulaciones, sostenibilidad

Introducción

costosas intervenciones de construcción y mantenimiento. Los neumáticos en desuso se han convertido en una amenaza persistente para el medio ambiente, acumulándose en grandes cantidades en vertederos y espacios naturales.

Desde una perspectiva económica, el uso de caucho reciclado presenta una ventaja significativa. Al ser un material derivado de estos neumáticos, con una vida útil promedio de 3 a 5 años, tardan entre 500 y 1,000 años en degradarse, generando problemas ambientales como la contaminación por sustancias tóxicas y la posibilidad de incendios. Esta reducción en los costos de materiales puede tener un impacto positivo en el presupuesto de proyectos de gran envergadura, tales como carreteras, aeropuertos o edificaciones en áreas con suelos inestables, o con poca cantidad de caucho reciclado, obtenidas de neumáticos gruesos.

Además, la reutilización de partículas trituradas, en la estabilización de suelos.

Se pudo notar que el caucho reciclado no solo responde a una necesidad ha es un material de gran potencial en técnica y económica, sino que también va de aplicaciones geotécnicas. Sus propiedades, la mano con el enfoque actual hacia una como la elasticidad, resistencia al desgaste y construcción más sostenible. Al utilizar un capacidad de absorber impactos, lo hacen material que existe en grandes cantidades en especialmente adecuado para mejorar los botaderos o en los ríos de la ciudad, se características mecánicas del suelo. Cuando se promueve la economía circular, se reduce la incorpora en la estabilización de suelos, las cantidad de neumáticos como basura y se partículas de caucho contribuyen a aumentar la optimiza su aprovechamiento.

En resumen, las partículas de caucho ofrecen resistencia al corte y reducir la densidad del suelo, lo que disminuye la probabilidad de una solución integral que no solo favorece la asentamientos y deformaciones bajo cargas pesadas, como a disminuir las dimensiones de viejos, sino que también aporta beneficios estructuras de contención a diseñar con este técnicos al mejorar las propiedades del suelo, relleno. Estas mejoras técnicas no solo reduce costos de diseño y construcción, como aumentan la estabilidad y durabilidad de las también promueve prácticas más sostenibles y infraestructuras construidas sobre estos suelos, responsables. Esta investigación busca sino que también optimizan su rendimiento a demostrar que la incorporación de este material largo plazo, minimizando la necesidad de en la estabilización de suelos no solo es viable,

sino que es una herramienta valiosa para el desarrollo de infraestructuras más duraderas, eficientes y ecológicas.

Objetivos

Objetivo General: Evaluar la Eficiencia de las partículas de Caucho Reciclado en la Estabilización de Suelos para la mejora de sus propiedades y economizar las estructuras.

Objetivos Específicos:

- Analizar el Impacto Ambiental de los neumáticos en desuso en la Ciudad de La Paz - Bolivia
- Caracterizar las Propiedades Físicas y Mecánicas de las partículas de caucho mezcladas con el suelo
- Clasificar el suelo a analizar según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS
- Determinar el Efecto del Caucho Reciclado en las Propiedades del Suelo respecto de uno sin las Partículas de Caucho
- Comparar el Rendimiento del Suelo Estabilizado con Partículas de Caucho Reciclado frente a Otros Materiales
- Analizar el Impacto Económico de la Incorporación de las Partículas de Caucho Reciclado en un Proyecto de Construcción, Caso Muro de Contención

Materiales y Métodos

El suelo es un agregado no cementado de partículas sólidas compuesto por granos minerales y materia orgánica descompuesta. Estos elementos se encuentran en un medio líquido y gaseoso que ocupa los espacios

entre las partículas sólidas. El suelo tiene una amplia aplicación como material de construcción en diversos proyectos de ingeniería civil.

Un suelo está conformado por 3 fases: fase Sólida, Líquida y de Vacíos

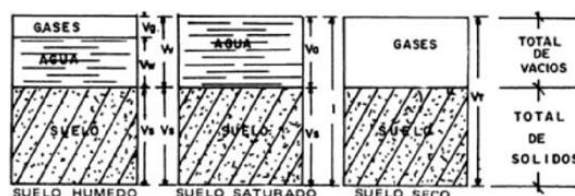


Figura 1. REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LAS 3 FASES DEL SUELO

Fuente: Crespo Villalaz (2024).

Entonces un suelo soportará las cargas totales que sobre él se apliquen. El esfuerzo total es la suma de todas las fuerzas aplicadas sobre una unidad de área de suelo, incluidas las cargas debidas al peso del suelo y cualquier estructura o sobrecarga que este por encima. El esfuerzo efectivo es la porción del esfuerzo total que es soportada directamente por los granos del suelo, y es el que controla la resistencia al corte y la deformación del suelo, esta característica es muy importante para nuestro trabajo de investigación. Finalmente, el esfuerzo de poros es la presión ejercida por los fluidos dentro de los poros del suelo, generalmente el agua. Estos esfuerzos están relacionados mediante la ecuación: $\text{esfuerzo total} = \text{esfuerzo efectivo} + \text{esfuerzo de poros}$. El concepto de esfuerzos efectivos es crucial en la estabilidad del suelo, ya que determina cómo se comportará el suelo bajo carga, especialmente en situaciones donde hay

presencia de agua, como en suelos saturados o en condiciones de fluctuación de nivel freático.

Suelos de Estudio

Se notará la importancia y una mejora considerable en la aplicación de suelos Finos como *Arcillo limosos*; donde estos tienen partículas muy finas con alta cohesión y baja permeabilidad, pero son propensos a la expansión y contracción con los cambios en el contenido de agua, lo que puede causar problemas de estabilidad. Las partículas de caucho reciclado pueden reducir los efectos de expansión y contracción, mejorando la estabilidad volumétrica y la resistencia al corte. También puede ayudar a reducir la plasticidad y mejorar el drenaje del suelo.

Suelos Areno-arcillosos; sobre todo los arenosos tienen partículas grandes y sueltas con baja cohesión y alta permeabilidad. Su capacidad de carga es alta, pero tienden a ser susceptibles al deslizamiento y carecen de estabilidad bajo cargas pesadas. Las partículas de caucho pueden ayudar a mejorar la cohesión y resistencia al corte de los suelos arenosos, aumentando su estabilidad y capacidad para soportar cargas sin asentamientos diferenciales.

Tabla 1. Diferencias Entre Suelos Grueso Y Finos

SUELOS GRUESOS (>1mm)
Sus partículas componentes son visibles a simple vista
La forma de las partículas puede ser angular o redondeada
No poseen minerales arcillosos

Suelos no cohesivos
Muy alta permeabilidad $k > 10^{-2}$ cm/seg
El tamaño de los vacíos es mayor, pero el volumen total de vacíos es menor: $e < 0,85$
Si se aplica una sobrecarga importante, el asentamiento del suelo es instantáneo
SUELOS FINOS (<1mm)
Sus partículas componentes no son visibles a simple vista
La forma de las partículas puede ser laminar, angular o redondeada
Pueden poseer minerales arcillosos
Suelos cohesivos
Permeabilidad: Alta (arenas finas), media a baja (limos), muy baja o nula (arcillas) $k < 10^{-2}$ cm/seg
El tamaño de los vacíos es menor, pero el volumen total, de vacíos es mayor: arcilla blanda $e > 1,2$; montmorillonita $e > 5$
Si se aplica una sobrecarga importante, tienen asentamiento diferidos en el tiempo

Fuente: Dra. Ing. Silvia Angelone -Rodrigo Zapata (2018).

En la clasificación de los suelos desarrollado por Arthur Casagrande, el sistema cubre los suelos gruesos y los finos, distinguiendo ambos por el cribado a través de la malla 200, las partículas gruesas son mayores que dicha malla y por supuesto las finas, menores, un suelo grueso se considera de esta forma si más del 50% de sus partículas son gruesas, en cambio, un suelo fino es considerado así, si más del 50% de sus partículas, en peso, son finas (Badillo & Rodríguez, 1974).

En el caso de suelos finos, que son los que tratamos de mejorar en sus propiedades mecánicas, para este caso el Sistema

considera a los suelos agrupados (M, C, O), si es menor del 50%, si son suelos de compresibilidad baja o media, se añade el símbolo genérico L, los suelos finos con limite liquido mayor a 50%, o sea alta compresibilidad, se le agrega el símbolo genérico H (Badillo & Rodríguez, 1974).

Neumáticos

Es de conocimiento que la ciudad de La Paz presenta varios cauces o ríos, y que también estos funcionan como basurales para muchas personas inconscientes que botan la basura hacia estos; así mismo la quema de estos ha aumentado considerablemente en los últimos años, debido también al gran incremento del parque automotor en la ciudad.

Según el último censo de Población y vivienda de 2024, se conoce que el parque automotor en Bolivia aumento exponencialmente, siendo a nivel nacional 2.470.622 vehículos hasta el 2023, de los cuales la ciudad de La Paz tes el segundo departamento después de Santa Cruz con el mayor porcentaje de este parque automotor, con el 560.217 vehículos correspondiente al 22.68%.

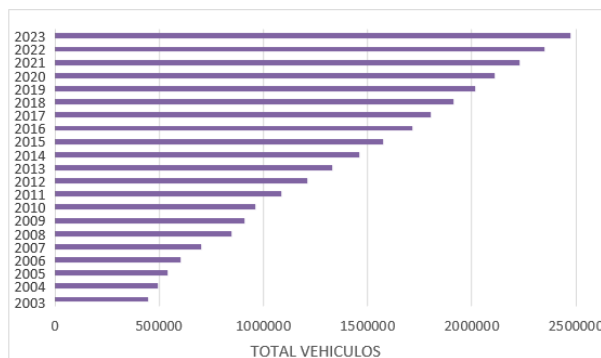


Figura 2. Parque automotor a nivel nacional

Fuente: Instituto Nacional de Estadística - INE 2024
 La contaminación por desecho de los neumáticos no es un problema exclusivo de La Paz, ya que en Santa Cruz también se vive esta situación, por ejemplo, en las calles del municipio de Montero.



Figura 3. Basural de neumáticos en Santa Cruz

Fuente: Diario Los Tiempos

Entonces ¿en qué tiempo se deberían desechar estos neumáticos? La vida útil varia desde los de baja calidad, que sería entre 10.000 a 15.000 Km de uso, hasta los de mejor calidad que pueden rodar hasta 40.000Km. Se estima que en Bolivia se utilizan alrededor de 3 MM de neumáticos al año, por tanto, la afectación ambiental es notoriamente alta, sin saber cuál será el destino de todos estos neumáticos ya usados.

Un neumático se hace con caucho natural y sintético. La materia prima de este último es el petróleo, mientras que el caucho natural procede del líquido lechoso (látex) de diversos árboles tropicales, sumado a esto, tiene aros de acero que se extraen de la tierra y tela de Nylon que utiliza bastante agua para su fabricación; ya de por si la huella hídrica también es muy alta.

Huella hídrica

Para fabricar 4 neumáticos se requieren 9400 litros de agua y 100 litros de petróleo crudo para los neumáticos de un camión y 45 litros para las ruedas de vehículos 4x4.

Recuperación de Caucho

El caucho en desuso, que en su mayoría son neumáticos reutilizados que ya cumplieron su vida útil, puede convertirse en una gran fuente de energía reutilizable, al ser valorizado y usado en múltiples campos aplicativos entre uno de ellos la ingeniería. Por ello, es esencial evitar su desecho y promover una gestión para su reciclaje a través de plantas recicladoras autorizadas, como ya la hay en Santa Cruz con Fabugoma, una empresa de trituración del caucho de neumáticos, que tiene 2 procesos de Reciclado:

Granulo de Caucho, donde las llantas de moto desechadas son trituradas y transformadas en una tonelada diaria de granulo de caucho que es una materia prima que Fabugoma vende a otros emprendimientos dedicados a la fabricación de canchas sintéticas, baldosas, pisos de goma, entre otros productos; y estas se utilizaran para estabilizar los suelos anteriormente ya mencionados. Entonces el proceso de obtención de las partículas de caucho es simple, con el uso de trituradoras donde son introducidos los neumáticos y posteriormente seleccionadas las piezas de mayor tamaño para nuevamente ser trituradas., así hasta obtener el tamaño de

grano deseado.



Figura 4. Partículas de Caucho

Fuente: Fabugoma (Santa Cruz)

Bujes de Goma: cada mes la empresa recibe de 10 a 15 neumáticos de maquinaria agrícola, de los cuales realizan las bujías de gomas, con el fin de tener bujías que amortigüen la vibración generada por el quipo; sin embargo, este proceso también genera desperdicio de caucho, que nuevamente es triturado para obtener más partículas o granos de caucho de 1 a 5mm. Este tipo de partículas es utilizado en las canchas deportivas de césped sintético, para alargar la vida útil de estos, y otorgar protección a los deportistas en las caídas.

Ensayos de Clasificación del Suelo

Para poder clasificar los suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS, se realizan diferentes ensayos de granulometría, que, dependiendo el tamaño de las partículas sólidas, determinara si es un

suelo Grueso o Fino, y de que características. Para tal efecto existen normas internacionales estandarizadas, cuyos procedimientos se realizan en el Instituto de Ensayo de Materiales de la Carrera de Ingeniería Civil – UMSA. Y son a estos a los que recurriremos para poder clasificar el suelo a analizar.



Figura 5. Ensayo de Límites de Consistencia
Fuente: Elaboración propia en los Laboratorios IEM - UMSA

Ensayos de Resistencia al Corte en el Suelo

Los criterios de ensayo de corte y el círculo de Mohr son herramientas clave en la mecánica de suelos para evaluar la resistencia al corte y la estabilidad bajo cargas. El *ensayo de corte* determina la resistencia máxima del suelo antes de fallar, utilizando pruebas como el corte directo o el triaxial. El *círculo de Mohr* representa gráficamente los esfuerzos normales y cortantes en un punto del suelo, permitiendo identificar el punto de falla mediante el criterio de Mohr-Coulomb. Estos métodos son esenciales para predecir el comportamiento del suelo en estructuras, ayudando a diseñar soluciones más seguras y estables en

proyectos geotécnicos.

En la siguiente figura, vemos en el punto “d” las tensiones máximas de esfuerzo normal y al corte, y la recta tangente al círculo de Mohr correspondiente a dos veces el ángulo teta de falla en la probeta de suelo, este nos determinara los parámetros de resistencia del suelo; como la Cohesión “c” y el ángulo de fricción interna “ ϕ ”.

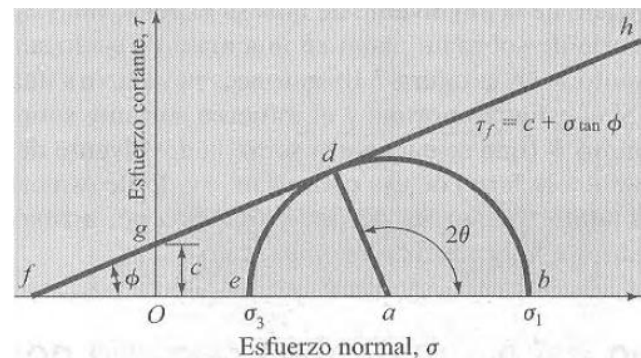


Figura 6. Círculo de Mohr y envolvente de falla
Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja Das

Partículas de Caucho en el Suelo

Mediante los Ensayos de Corte, y los criterios de falla de Mohr Coulomb, se determinan los parámetros resistentes del suelo como lo son la cohesión y Angulo de fricción interna. Se realizaron los ensayos con la arcilla analizada en la ciudad de La Paz, como también una comparación con una investigación similar. En la investigación realizada por el ing. Víctor Escalante Herrera, se determinaron mezclas de suelos con porcentajes de partículas de caucho para determinar la variación de los parámetros resistentes del suelo, según lo siguiente:

Tabla 2. Muestras de pruebas con Caucho añadido

% de adición de fibras de caucho reciclado	Numero de réplicas del testigo
LINEA BASE (0.0)%	3
3%	3
5%	3
15%	3
TOTAL	12

Fuente: Víctor Escalante Herrera

Se determino los parámetros con los ensayos de Corte al suelo según la normativa del ensayo respectiva. A fin de comparar la economía del estudio, se realizará una modelación de los parámetros con y sin partículas de caucho, al caso de análisis de estabilidad de un Muro de contención en Voladizo, haciendo uso del Software que la carrera de Ingenieria Civil tiene Licencia: *Fine Geo5 Software Geotécnico*, con el módulo de *Muros de contención en voladizo*.



Figura 7. Logo Software Fine GEO5

Fuente: finesoftware.es

Muros de Contención
El análisis de estabilidad en muros de contención se basa en garantizar que la estructura pueda resistir las fuerzas que actúan sobre ella misma, principalmente el empuje del suelo. Los fundamentos clave incluyen:

Resistencia al Deslizamiento y Vuelco: Se evalúa si el muro puede resistir el deslizamiento sobre su base y si puede evitar el vuelco. Esto se logra a través de la verificación del coeficiente de seguridad, que compara las fuerzas resistentes con las fuerzas desestabilizadoras, como los momentos resistentes con los momentos desestabilizadores, el profesor Braja Das nos recomienda considerar como factores de seguridad mínimos:

FS > 1.5 para la verificación al Deslizamiento

FS > 2 para la verificación al vuelco

Capacidad de Carga del Suelo: El suelo bajo la base del muro debe tener suficiente capacidad portante, o también llamada de soporte, para soportar las cargas sin que se produzcan fallas de asentamiento o colapso. También el profesor nos recomienda que las tensiones provocadas en la base de la cimentación sean menores a la Tensión admisible del suelo.

$$\sigma_{adm \text{ del suelo}} > \sigma_{max \text{ de la fundacion}}$$

Resultados y Discusión

Determinados los ensayos de laboratorio según las normativas para la realización de estos, como indica a continuación:

Tabla 3. Ensayos de Laboratorios de Suelos

Contenido de	de
1 Humedad	ASTM D 2216-19
2 Granulometría	ASTM D6913/D6913M-17
3 Hidrometría	ASTM D4928-21 & 1
4 Límites	ASTM D4318-17 & 1

5	Densidad (trozos Inalterados)	ASTM D 4531-2015
6	Corte consolidado no drenado	ASTM D 3080-D 3080 M -11

Fuente: ASTM

Realizada la Clasificación del suelo según las normas indicadas anteriormente, se determinó que el suelo es fino, pasando la mayoría en peso, por el tamiz que divide suelos gruesos de finos.

Se determino el Limite Liquido LL, Limite Plástico LP, y el Índice de plasticidad IP con el ensayo de Limites de Consistencia, para clasificar este suelo, dándonos como resultado un suelo de tipo CL, es decir una *Arcilla de Baja Plasticidad*.

Gráfica de plasticidad del USCS

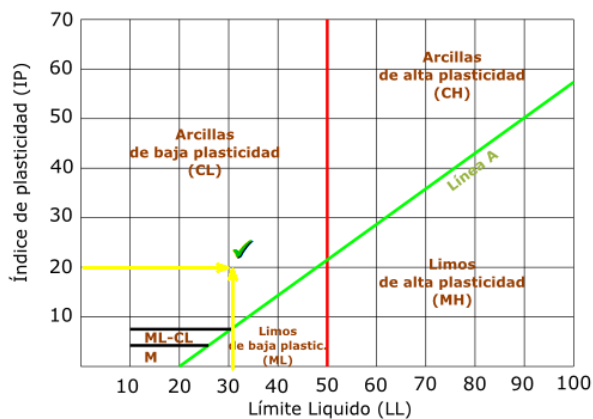


Figura 8. Grafica de Plasticidad para clasificar el Suelo como CL – Arcilla de Baja Plasticidad Fuente: Elaboración Propia con los resultados de los ensayos

Determinamos los valores de los parámetros definidos del suelo.

Tabla 4. Parámetros del Suelo

Parámetro	Valor
Peso Especifico (Ps)	2.693
Densidad Seca	1.175
Contenido de Humedad (W)	12.20%
Limite Liquido (LL)	31%
Limite Plastico (LP)	20%
Índice de Plasticidad (IP)	11%
Material que pasa la Malla N° 200	90.40%
Contenido de Finos (F=C+M)	90%
Contenido de Coloides	35%
Contenido de Arcillas (C)	17%
Contenido de Limos (M)	38%

Estos valores son del suelo en su estado natural, es decir sin cambiar su estructura con la adición de las partículas de caucho.



Figura 9. Muestra de Suelo cubierta con Parafina para el ensayo de Trozos Inalterados Fuente: Elaboración Propia Laboratorio de suelos IEM - UMSA



Figura 10. Balanza para medir el Peso de la Muestra cubierta de Parafina Sumergida en agua Fuente: Elaboración Propia Laboratorio de suelos IEM - UMSA

Los parámetros resistentes del suelo cambian con la adición de partículas de caucho, así que obtenemos:

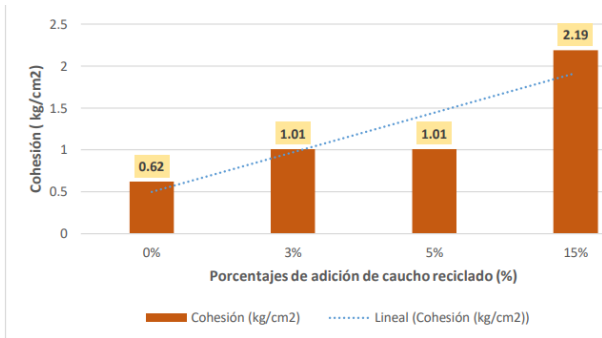


Figura 11. Cohesión vs Porcentaje de adición de caucho reciclado
Fuente: Víctor Escalante Herrera

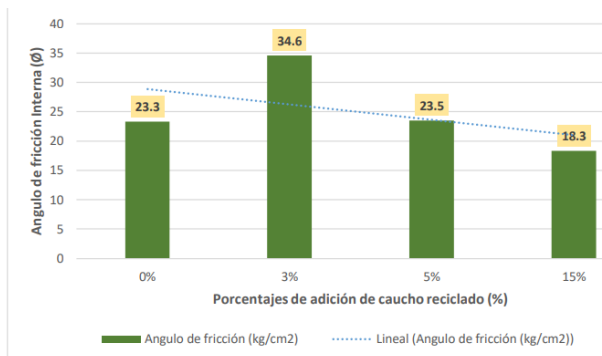


Figura 12. Angulo de Fricción interna vs Porcentaje de adición de caucho reciclado
Fuente: Víctor Escalante Herrera

Se puede notar que las propiedades de resistencia del suelo cambian notablemente, siendo que existe un aumento de la cohesión desde que se añade 3% de caucho reciclado hasta el 15% añadido; sin embargo, para el Angulo de fricción interna observamos que existe un aumento hasta el 3%, pero después este valor va disminuyendo.

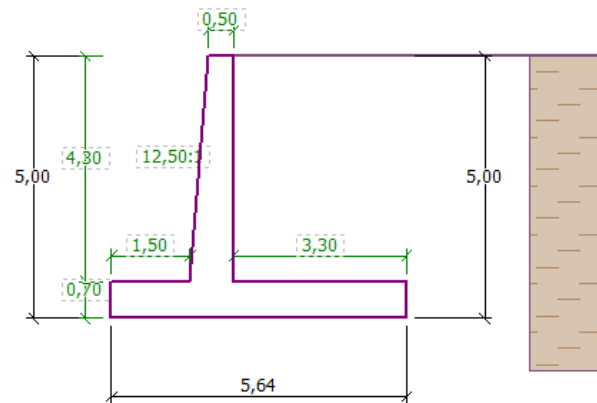
Para realizar la comparación en una estructura y analizar si la influencia de las partículas de caucho economizara nuestras estructuras, pasaremos a modelar el muro de contención en voladizo con el software Fine GEO5.

SUELO SIN ADICION DE PARTICULAS DE CAUCHO

(Altura de muro de contención 5m)

Angulo de Fricción interna: 23.3°

Para salvar 5 metros de altura con un muro de contención en voladizo, la geometría que proporcionara estabilidad a la estructura es la siguiente:



Figuro 13. Muro de Contención en Voladizo con suelo sin Partículas de Caucho
Fuente: Modelación Propia con Fine GEO5

Donde podemos ver que tenemos una longitud del talón (Parte trasera del muro de contención) de 3.3m de profundidad.

Además, notamos que la capacidad portante del suelo también se cumple con 58.8 KPa.

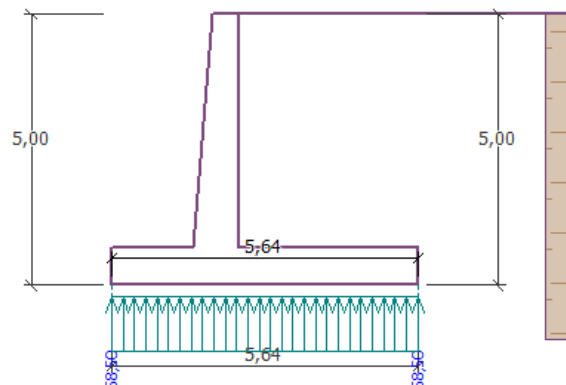


Figura 14. Muro de Contención en Voladizo con suelo sin Partículas de Caucho – Cap. Portante
Fuente: Modelación Propia con Fine GEO5

SUELO CON ADICION DE PARTICULAS DE CAUCHO

(Altura de muro de contención 5m)

Angulo de Fricción interna: 34.6°

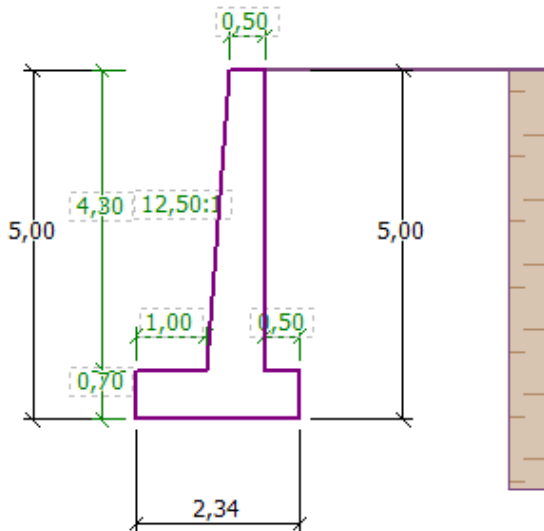


Figura 15. Muro de Contención en Voladizo con suelo con Partículas de Caucho
Fuente: Modelación Propia con Fine GEO5

Podemos notar claramente que la geometría para dar estabilidad a la estructura es mucho más pequeña, por lo que el costo de la obra, disminuirá considerablemente, siendo esta una sección más pequeña. También notamos que existe una mejor distribución de tensiones en el suelo, aprovechando más su capacidad portante.

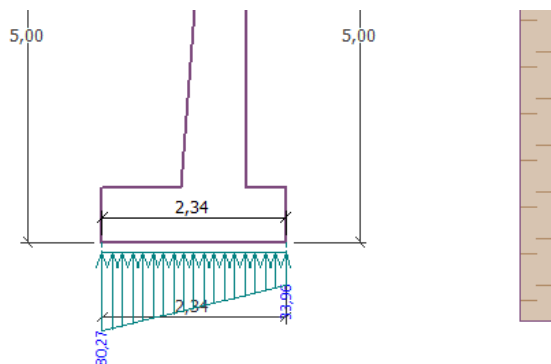


Figura 16. Muro de Contención en Voladizo en suelo con Partículas de Caucho – Cap. Portante
Fuente: Modelación Propia con Fine GEO5

DISCUSION

La adición de las partículas de caucho mejoraron las propiedades de resistencia del suelo con una adición del 3%. la estabilidad que se determinó en la estructura determinó factores de seguridad:

Suelo sin adición de partículas de caucho

FS al vuelco: 10.86 > 2
FS al Deslizamiento: 1.56 > 1.5
Tensión Máxima en la fundación de la estructura: 58.8 KPa

Suelo con adición de partículas de caucho

FS al vuelco: 3.02 > 2
FS al Deslizamiento: 1.53 > 1.5
Tensión Máxima en la fundación de la estructura: 80.3 KPa

Para la geometría más económica, la puntera del muro disminuyo a 1m y el talón a solo 0.5m, dando un ahorro bastante alto son solo la mejora de los parámetros resistentes del suelo, como lo son la cohesión y el ángulo de fricción interna.

Aunque el caucho en sí no es cohesivo, su presencia en el suelo actúa como un ligante que mejora la cohesión entre las partículas del suelo asumiendo también el papel de partículas gruesas dentro de la arcilla. Esto contribuye a una mayor resistencia al corte, especialmente en suelos de baja cohesión, como los arenosos arcillosos; en nuestro caso, claramente se ve la mejora de la cohesión para optimizar el diseño de la estructura.

Las partículas de caucho reciclado pueden

actuar como ligantes dentro de la matriz del suelo, aumentando la fricción interna y, por lo tanto, la resistencia al corte. Esto es beneficioso en suelos que no pueden tener un ángulo de fricción interna muy elevado. El caucho reciclado introduce elasticidad en el suelo, lo que puede ayudar a distribuir y absorber cargas de manera más eficiente, reduciendo el riesgo de fallas por deslizamiento, esto es muy importante al momento de analizar la estabilidad global de la estructura.

Conclusiones

- Se verificó que la adición de las partículas de caucho ayudó a disminuir la sección del muro de contención, ahorrando sustancialmente los costos de construcción, siento una disminución de sección del muro de más de 2.3m² de área, y como los muros de contención tienen una longitud mucho más larga, el ahorro es aún más en volumen, siendo por ejemplo para un muro de 5m de altura y 10m de longitud, un volumen de 23 m³ de Hormigón Armado de ahorro, que ahorraría entre ¼ a 1/3 del costo inicial de la Estructura.
Ahorro del 25 al 33% del costo de la estructura de Contención.
- El impacto ambiental por el desecho de los neumáticos es muy grande, ya que estos además de biodegradarse en cientos de años, se descomponen

lentamente, liberan una serie de compuestos tóxicos como metales pesados (plomo, cadmio, zinc) y productos químicos derivados del caucho, que pueden contaminar el suelo y los cuerpos de agua cercanos, afectando tanto la vida vegetal como animal.

- Se clasificó al suelo como de tipo fino, más precisamente como Arcilla de Baja Plasticidad CL, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS, realizando los ensayos normalizados por la ASTM.
- Se determinó la densidad o peso específico del suelo, según los procedimientos normalizados por la ASTM, con el ensayo de Trozos Inalterados.
- Como los neumáticos desechados tienden a acumular agua, esto es lo que los convierte en un hábitat ideal para la proliferación de mosquitos y otros vectores de enfermedades, como el dengue, chikungunya, y el virus del Zika; que son enfermedades presentes en nuestro país.
- Sin adición de partículas de caucho obtuvimos un ángulo de fricción interna de 23.3° y una cohesión de 0.62 kg/cm²
- Con la adición de partículas de caucho de 3%, que fue la proporción más óptima, se notó un aumento del ángulo de fricción interna a 34.6° y la

cohesión a 1.01 kg/cm². Estos últimos disminuyen los empujes laterales del suelo, por ello es que economizara cualquier estructura de contención o retención de los suelos, como ser muros de contención, ataguías, entibados, etc.

Referencias Bibliográficas

BADILLO, Juárez. Mecánica de suelos. Universidad Nacional Autónoma de México Limusa, 2005. 644 pp.

BRAJA, Das. Fundamentos de ingeniería de cimentaciones. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Séptima Edición – Mexico, 2012.

BRAJA, Das. Fundamentos de la ingeniería geotécnica. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, 4ta. ed. – Mexico, 2015.

CALAMANI, Limber. Estabilización De Suelo Fino Arcilloso (Cl) Con Desechos De Fibras De Botellas Pet Y Cemento Ip-40, Aplicado En Una Subrasante. Facultad de Ingeniería, UMSA. La Paz, Bolivia. 2023

ESCALANTE, Víctor. Influencia de las fibras

de caucho reciclado en la resistencia al corte no drenado de los suelos arcillosos expansivos. Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería. Lima Perú, 2019

VILLALAZ, Crespo. Mecánica de suelos y cimentaciones. 5ta. Ed., Mexico Monterrey, 2004. 650 pp.

ASTM D2216 Organización Mundial del Comercio (OMC), Estados Unidos, 16 de enero de 2019.

ASTM D6913 Organización Mundial del Comercio (OMC), Estados Unidos, 16 de enero de 2019.

ASTM D4928 Organización Mundial del Comercio (OMC), Estados Unidos, 16 de enero de 2019.

ASTM D4318 Organización Mundial del Comercio (OMC), Estados Unidos, 16 de enero de 2019.

ASTM D4531 Organización Mundial del Comercio (OMC), 2017.

ASTM D3080 Organización Mundial del Comercio (OMC), 2011.

INE, Instituto Nacional de Estadística, Bolivia (2024).

28.- Ingeniería Mecánica y de la Producción

Calibración de un modelo electroquímico para baterías de segunda vida

Autor: Rivoir-Engelhardt, Facundo; frivoir@fing.edu.uy

Co-autor(es): Frankenstein, Bruno; Bibiloni, Sebastián

Orientadores: Martínez, Santiago; smartinezb@fing.edu.uy, Teliz, Erika,
erikateliz@gmail.com

Universidad de la República / Facultad de Ingeniería / Faraday Lab

Resumen

El avance sostenido de la movilidad eléctrica como alternativa a los vehículos impulsados por combustibles fósiles ha generado un crecimiento acelerado en la demanda y uso de baterías, siendo las de ion-litio las más usadas. Dado que poseen una vida útil limitada, se proyecta un elevado volumen de baterías descartadas de forma prematura, lo que implica tanto un impacto ambiental como un desaprovechamiento de recursos. En este trabajo se estudia una batería retirada de un vehículo utilitario. Se procede a su desarme y análisis, con el objetivo de realizar ensayos que permitan caracterizar su estado de salud actual y establecer una caracterización completa de la batería. A partir de la información experimental relevada se procede a calibrar un gemelo digital mediante un modelo electroquímico en el software GT AutoLion. El modelo calibrado se utiliza para simular el funcionamiento en posibles aplicaciones de segunda vida y el diseño de dichos sistemas. El objetivo final es predecir su desempeño a futuro y facilitar el diseño de bancos de baterías reutilizadas. Los resultados obtenidos muestran una buena concordancia entre los perfiles simulados y experimentales, con errores inferiores a 0.07 V en la calibración OCV y de hasta 0.12 V en ensayos dinámicos. En la etapa de validación, el modelo mantuvo un error de 0.021 V, evidenciando su robustez para estimar el comportamiento de la celda en escenarios reales de almacenamiento energético.

Palabras clave: Baterías Ion-Litio, Electroquímica, Simulación Numérica, Ensayos Experimentales

Introducción

El crecimiento acelerado de la movilidad eléctrica ha generado una demanda creciente de baterías recargables, siendo las de ion-litio las más utilizadas debido a su elevada densidad energética, buena eficiencia y vida útil extensa (Broussely, M. (2010)). Sin embargo, la vida útil de estas baterías no es infinita y según el caso de aplicación, puede llegar a un punto en el que su futuro uso resulta inviable, como es el caso de vehículos eléctricos, no obstante, las mismas pueden encontrar otras aplicaciones (Yang, L., et al (2021)). Muchas conservan una fracción significativa de su capacidad, lo que permite considerarlas candidatas viables para aplicaciones estacionarias de menor exigencia, dando lugar al concepto de baterías de "segunda vida" (Shahjalal, M., et al. (2021)).

Este enfoque no solo contribuye a reducir el impacto ambiental asociado al descarte prematuro de estos dispositivos, sino que también representa una estrategia económicamente atractiva para el aprovechamiento del recurso (Garche, J., & Brandt, K. (2018)). Si se busca una aplicación de segunda vida, es necesaria una caracterización rigurosa de su estado de salud y un modelado preciso de su comportamiento, que permita evaluar su

desempeño futuro en diferentes condiciones de operación, logrando entonces, optimizar su uso y aplicación, así como conocer las limitaciones del sistema (Spek, E. J. (2018)).

En este contexto, el presente trabajo se centra en el estudio y calibración de un modelo electroquímico detallado de una celda recuperada de una batería de un vehículo eléctrico Renault Kangoo ZE (Car Info. (2016)). A partir del desarme físico de la batería y la realización de ensayos experimentales, se busca obtener los parámetros necesarios para ajustar un gemelo digital implementado en el software GT-AutoLion (Gamma Technologies. (2020)). El modelo calibrado permite no solo simular el comportamiento dinámico de la celda bajo distintos regímenes de carga, sino también validar su posible aplicación en sistemas estacionarios, aportando una herramienta fundamental para el diseño y dimensionamiento de bancos de baterías de segunda vida (Iqbal, H., et al (2023)).

Objetivos

- Desarmar una batería de segunda vida proveniente de un vehículo eléctrico.
- Caracterizar los materiales y las principales características

electroquímicas mediante ensayos eléctricos en un ciclador, y mediante estudios post-mortem.

- Calibrar un modelo Electroquímico de la batería.

Materiales y Métodos

Para la realización del estudio se contó con una batería de la utilitaria Renault Kangoo ZE modelo 2014 (Car Info. (2016).), dicha batería fue donada por UTE (Usinas y Transmisiones Eléctricas del Estado). UTE da uso a estas utilitarias tanto para prestar servicio (ver Figura 1), como para atender las necesidades del público ante interrupciones del servicio eléctrico en las ciudades. Con el objetivo de promover la movilidad eléctrica, se adquirieron una flota inicial de 30 vehículos, que al momento de la compra (2014) declaraban un máximo de 170 km. La donación de las baterías llega a manos del equipo de trabajo en el contexto de que las mismas se notaban severamente degradadas al punto de que su autonomía significaba un impedimento a la hora de su uso.



Figura 1: Flota de Renault Kangoo ZE de UTE.

Con la batería extraída del vehículo se procede a su desarme en los laboratorios del Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial de Facultad de Ingeniería (ver Figura 2). El desarme consistió en la extracción de todas las piezas constituyentes, hasta llegar a los módulos (ver Figura 3).



Figura 2: Batería por dentro Renault Kangoo ZE.



Figura 3: Extracción de módulos

Cada módulo consta de cuatro celdas tipo pouch, dispuestas en una configuración 2P2S, es decir, dos celdas en paralelo y dos en serie, según se muestra en la Figura 4.

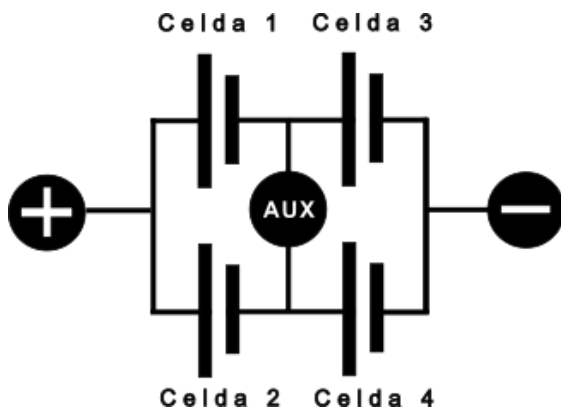


Figura 4: Esquema del módulo de Renault Kangoo ZE.

A partir de un módulo, se realiza un desarme completo del mismo, separando

las celdas que los constituyen a efectos de hacer un análisis del estado post-mortem (ver Figura 5 y Figura 6). Dicho análisis provee datos exactos sobre la química de la celda y su composición exacta, un ensayo por microscopía SEM (ver Figura 7 y Figura 8) permite relavar parámetros geométricos de la celda, como los espesores de electrodos, tamaño del particulado en material activo entre otros. En la Tabla 1 se presenta un resumen con datos técnicos de la celda.



Figura 5: Celdas separadas Renault Kangoo ZE.



Figura 6: Celda desarmada, se observan las hojas de cátodo y ánodo alternadas.

Tabla 1: Resumen técnico de la celda utilizada.

Tipo de celda	Pouch – Laminada
Capacidad Nominal	35 Ah
Rango de voltaje	2.8-4.2 V
Densidad Energética	169 Wh/kg
Química cátodo	LMO (66%) – NMC 532 (22.5%) – Grafito (11.5%)
Química ánodo	Grafito

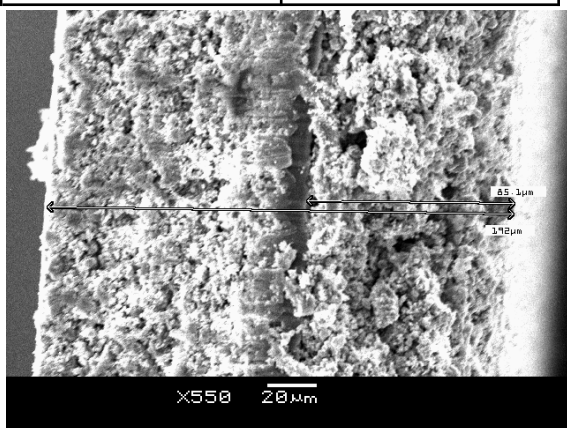


Figura 7: Microscopia SEM del cátodo realizada en Faraday Lab.

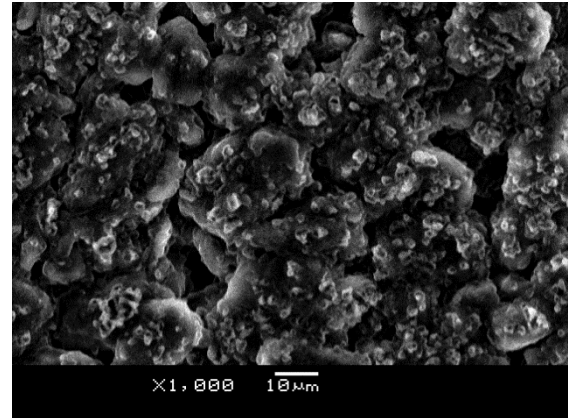


Figura 8: Microscopia del material particulado en el ánodo realizada en Faraday Lab.

Las celdas son ensayadas con el uso de un ciclador Chroma. El ciclador es una herramienta capaz de realizar procedimientos avanzados de carga y descarga, permitiendo el ciclado de la misma, así como disponer la celda ante perfiles de pulso y carga variable.

A cada módulo se le realiza un ensayo de carga y descarga completo a 1 C-rate (nominal) a efectos de determinar su actual capacidad y determinar diferencias entre módulos.

Con ello, se elige una celda con comportamiento próximo al promedio, dicha celda es la elegida para hacer la caracterización y posterior calibración del modelo. A posteriori, se hacen los ensayos presentados en la Tabla 2.

Tabla 2: Resumen de los ensayos realizados.

Ensayo	C-rate	V _{max}	V _{min}
OCV	1/50	8.4	5.8
Performance	0.5; 1; 1.5	8.4	5.8

El ensayo OCV es un ensayo a baja corriente que busca relevar una curva similar a la curva de voltaje a circuito abierto de la celda, con el objetivo de encontrar una relación entre voltaje y SOC, donde este último refiere al estado de carga, usualmente expresado como porcentaje de la capacidad remanente, frente a la nominal. El ensayo propuesto permite calibrar en el software todos los parámetros que resultan ser independientes de la carga sobre la celda. Los ensayos categorizados como de performance buscan caracterizar la respuesta en voltaje y temperatura de la celda, cuando es exigida a distintos niveles de corriente (C-rate), esto da la información necesaria para llevar calibrar el aspecto dinámico o bajo carga de la celda, pudiendo evaluar un perfil.

El modelado de los módulos se realiza en el software GT AutoLion (Gamma Technologies. (2020)) a partir del modelo P2D (Pseudo 2D) ideado por Newman et al. (Newman, J. (2021)). El modelo se basa en la teoría del electrodo poroso, donde estos son considerados como soluciones sólidas de un material particulado, donde la intercalación de especies es modelada a partir de diferencias de concentración y procesos difusivos (ver esquema Figura 9). Dicho

modelo discretiza la celda mediante el uso de una dimensión longitudinal, la cual representa el transporte de especies y carga a través del separador, definiendo el potencial entre electrodos y la corriente entre ellos. Por último, la pseudo segunda dimensión, siendo esta sobre el radio del material activo en el cual se asume que su estructura es particulado esférico y desde ella se dan los intercambios superficiales a nivel microscópicos, desde donde suceden los fenómenos difusivos.

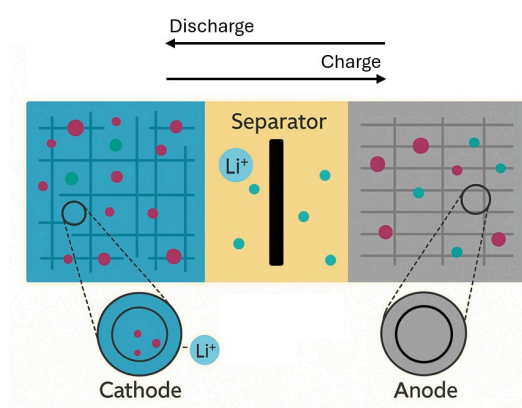


Figura 9: Esquema conceptual del modelo P2D.

El sistema está gobernado por un conjunto de ecuaciones diferenciales (Ecuaciones 1 a 5), siendo estas, balances de especies y masa en las direcciones radiales y longitudinal, la conservación de la carga en la fase sólida y electrolito, y la ecuación de Butler-Volmer para modelar las tasas de intercalación de los iones de litio, la cual cierra el sistema. Dado que el modelo es electroquímico, tanto el transporte de

especies, así como las reacciones que modelan el intercalamiento del litio son altamente dependientes de la temperatura, por ello, es necesaria la implementación de un modelo térmico que considere los balances de energía. En este caso, se asume a la celda como una masa a temperatura uniforme, la cual intercambia calor con su frontera por convección, a su vez, se consideran distintas fuentes de generación de calor, como las reacciones químicas, la resistencia interna y la generación entrópica de calor.

$$\frac{\partial}{\partial x} [\varepsilon_e c_e] = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_e^{eff} \frac{\partial c_e}{\partial x} \right) + \frac{1-t_+^0}{F} j^{Li} \quad (1)$$

$$\frac{\partial c_s}{\partial x} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_s r^2 \frac{\partial c_s}{\partial r} \right) \quad (2)$$

$$0 = \frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma_s^{eff} \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \right) - j^{Li} - a_{al} C \frac{\partial (\phi_s - \phi_e)}{\partial x} \quad (3)$$

$$0 = \frac{\partial}{\partial x} \left(k^{eff} \frac{\partial \phi_e}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_D^{eff} \frac{\partial \ln c_e}{\partial x} \right) + j \quad (4)$$

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = q_{rxn} + q_{rev} + q_{ohm} + q_c + q_{con} \quad (5)$$

La calibración se basa en el uso de un algoritmo evolutivo. Previo al procedimiento se deben seleccionar los parámetros o aspectos a calibrar del modelo, junto a ello se define un perfil objetivo, en este trabajo se trabaja con curvas experimentales de respuesta en voltaje. Luego, el software utiliza el algoritmo evolutivo para generar un set de parámetros de partida, sobre el cual ejecuta la simulación y evalúa una función objetivo que vincula el error cuadrático

medio entre la respuesta simulada y la experimental, con ello, se busca optimizar dicha función, minimizando de forma efectiva el error. En la Figura 10 se presenta un esquema resumido de la lógica del algoritmo.

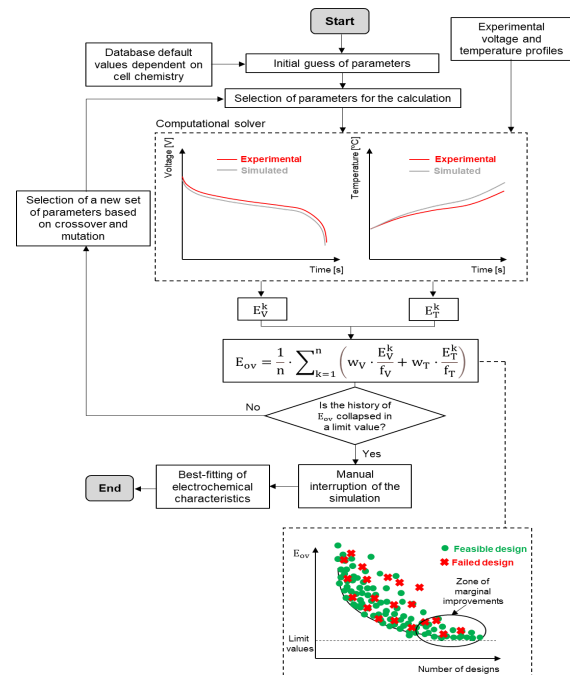


Figura 10: Esquema del procedimiento de calibración con el algoritmo evolutivo.

El procedimiento de calibración en GT–AutoLion (Gamma Technologies. (2020)) se subdivide en tres partes. En una primera instancia se realiza la calibración a circuito abierto de la celda. Para ello se utiliza el perfil relevado experimentalmente, donde se asume que la exigencia sobre la celda es lo suficientemente baja, como para que los factores involucrados en el comportamiento dinámico de la celda no

influyan, de modo que solo se estudian aquellos que definen la capacidad de la celda, la relación voltaje-SOC, y su estequiometría. Para ello, se calibran los siguientes parámetros:

- Potencial máximo en el cátodo y cátodo
- Capacidad de primera carga (LMO, NMC 532, ánodo)
- Capacidad de primera descarga (LMO, NMC 532, ánodo)
- Ratio N/P

Una vez calibrados los parámetros de circuito abierto, se definen los parámetros relacionados que influyen en el desempeño dinámico de la celda. Según se ilustra en la Figura 11, las celdas se caracterizan según si son para entregar potencia, o bien para almacenar energía, dependiendo de su uso, se obtendrán rangos de valores bien diferenciados.

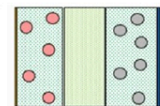
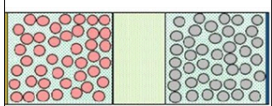
	Potencia	Energía
Descripción	Gran potencia de descarga por cortos periodos de tiempo	Baja potencia por un gran periodo de tiempo
Ilustración		
Descripción Electrodo	Menos material activo depositado, resultando en menor capacidad de almacenamiento de Li+ y mayor porosidad.	Más material activo depositado, porosidad y movilidad reducida
Aplicaciones	Vehículos híbridos (HEV), herramientas	Vehículos eléctricos (BEV), Dispositivos electrónicos
Pauta electrodos	Electrodos finos, alta porosidad	Electrodos gruesos, baja porosidad
Pauta separador	Separador fino	Separador grueso

Figura 11: Comparación entre tipos de celdas.

En este caso, como la celda es proveniente de un vehículo eléctrico, se

espera que tienda hacia una geometría del estilo de energía.

Con esto, los parámetros a calibrar resultan:

- Tamaño de partícula cátodo (LMO, NMC 532) y ánodo.
- Espesor cátodo, ánodo y separador
- Resistencia de contacto
- Difusión en cátodo y ánodo

Donde la difusión en cátodo y ánodo refiere al factor pre-exponencial y la energía de activación según se muestra en la ecuación (6).

$$D(T) = D_0(T) \cdot \exp \exp \left[\frac{E_{act}}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \right) \right] \quad (6)$$

Una vez calibrado el modelo en sus dos etapas, se procede a validarlo utilizando un perfil variable, que busca representar el uso de la batería como sistema de almacenamiento supliendo el consumo eléctrico de un edificio residencial.

Para evaluar los resultados obtenidos se utilizan las definiciones de error cuadrático medio entre respuestas, Percentil 95, error de carga y descarga, definidos según las ecuaciones (7) y (8), y además un análisis de sensibilidad de los parámetros.

$$\epsilon_{dch} = \frac{E_{sim,dch} - E_{exp,dch}}{E_{exp,dch}} \quad (7)$$

$$E_{dch,sim} = \sum_{i=1}^n \int_{t_0^i}^{t_f^i} I_{dch,sim}^i(t) \cdot V_{dch,sim}^i(t) \cdot dt \quad (8)$$

Resultados y Discusión

Una vez realizado el procedimiento de calibración inicial se obtienen los parámetros que mejor ajustan a la curva de circuito abierto de la celda. En la Tabla 3 se presentan los parámetros con los valores obtenidos, mientras que la respuesta se puede observar en la Figura 12.

Tabla 3: Parámetros óptimos de la calibración de OCV.

Parámetro	Valor	Unidad
LMO FCC	139.9	mAh/g
LMO FDC	128.2	mAh/g
NMC 532 FCC	250.6	mAh/g
NMC 532 FDC	196.8	mAh/g
Ánodo FCC	349.77	mAh/g
Ánodo FDC	290.0	mAh/g
U _{max} Cátodo	5	V
U _{max} Ánodo	2.5	V
Ratio N/P	1.12	-

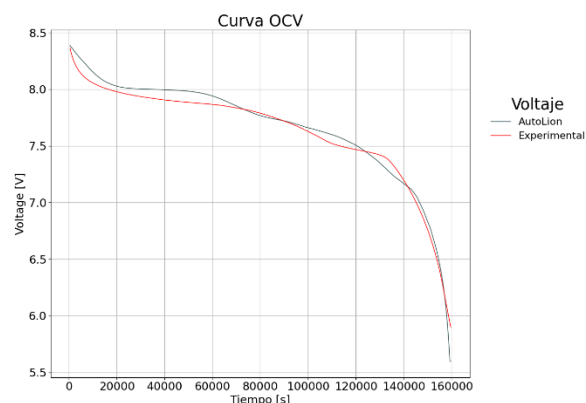


Figura 12: Respuesta en voltaje para calibración a OCV.

Al observar la Figura 12 se observa gran concordancia entre respuestas, hecho que se ve fuertemente soportado por los valores presentados en la Tabla 4. Donde se observan valores notablemente para todos los indicadores considerados.

Tabla 4: Resumen de indicadores para calibración de OCV.

Calibración OCV			
RMSE	Error medio	95th	100 * ϵ_{dch}
0.0698	0.059	0.11	0.43

Con los resultados obtenidos, se asume como bien calibrada la respuesta a circuito abierto, por lo que, imponiendo perfiles a corriente constante, para tres casos de C-rate (0.5, 1.0, 1.5 C), se obtienen los parámetros de respuesta dinámicos según se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Parámetros óptimos de la calibración de Performance.

Parámetro	Valor	Unidad
LMO Tamaño Partícula	14.99	µm
NMC 532 Tamaño Partícula	0.01	µm
Ánodo Tamaño de Partícula	4.74	µm
Espesor Cátodo	70.5	µm
Espesor Ánodo	70.0	µm
Espesor Separador	34.98	µm
Resistencia de contacto	9.99x10 ⁻⁴	Ω/m ²
LMO Difusión Energía de Activación	96.5	kJ/mol
NMC 532 Difusión Energía de Activación	325.4	kJ/mol
Ánodo Difusión Energía de Activación	942.3	kJ/mol
LMO Difusión Factor Pre-exponencial	0.18	-
NMC 532 Difusión Factor Pre-exponencial	1.8	-
Ánodo Difusión Factor Pre-exponencial	7.6	-

La respuesta de voltaje para cada caso se observa en la Figura 13, donde se si bien se observan apartamientos para los casos de 1.0 y 1.5 C, en general se tiene una respuesta fiel en el rango medio de voltaje, mientras que en la parte final de la descarga se observan apartamientos mayores que sugieren cierta debilidad del modelo hacia el fondo del estado de carga de la celda. Los errores obtenidos se muestran en la Tabla 6. A bajo estado de carga pesan más los efectos difusivos y de transporte de masa. En especial, tal como se observa en los resultados obtenidos, el factor difusivo en el cátodo es menor que el ánodo, durante la descarga, el litio migra hacia el cátodo, pero sobre el final de la curva, la difusión e intercalación se ve limitada por la

saturación y dificultad de que los iones sean capaces de disponerse en el materia activo del cátodo.

La capacidad del modelo para representar adecuadamente el proceso difusivo a lo largo de toda la descarga es clave para reproducir la pendiente de la curva de voltaje hacia el final del ciclo. Esto se debe a que la continuidad del intercalamiento y la reacción del litio, regulada por la difusión dentro de los electrodos, determina el potencial entre ellos, y por ende, el voltaje de celda.

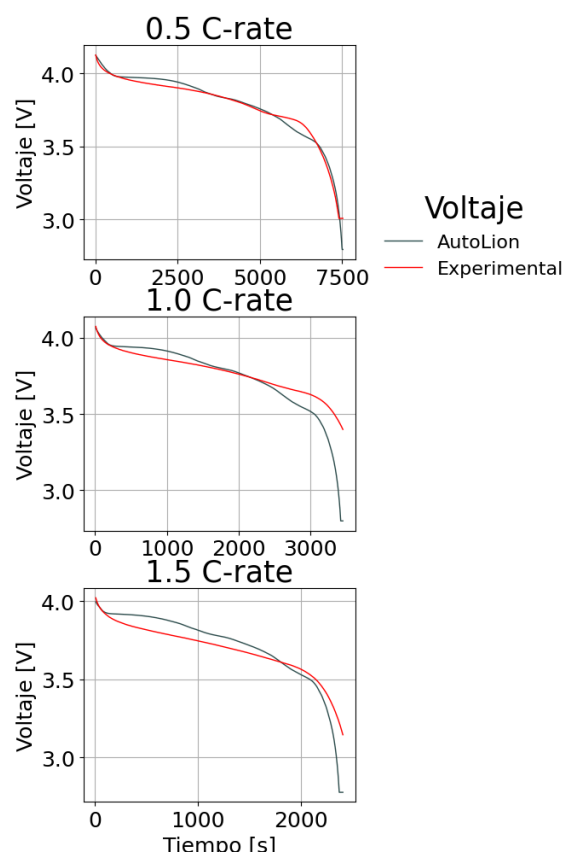


Figura 13: Respuesta en voltaje a varios C-rate.

Tabla 6: Resumen de indicadores para calibración de Performance.

Calibración Performance				
Caso	RMSE	Error medio	95th	100 * e
0.5C	0.036	0.026	0.069	0.14
1.0C	0.12	0.064	0.25	-0.83
1.5C	0.092	0.067	0.13	0.45

Por último, se evalúan los resultados del ciclo de validación, donde la batería opera en una instalación bajo la premisa de funcionamiento como 'Load shifting', donde la batería capta energía comprada en un horario barato, para usarlo cuando la misma resulta más cara. Dado que el uso es en un edificio, resulta que la carga es variable, poniendo a prueba la regulación a varios C-rate, observándose que habrán valores tanto por debajo como por encima de 0.5 C y 1.5 C. En la figura (), se observa el perfil de potencia en el tiempo, el cual es el impuesto sobre la batería para realizar el ciclo de uso.

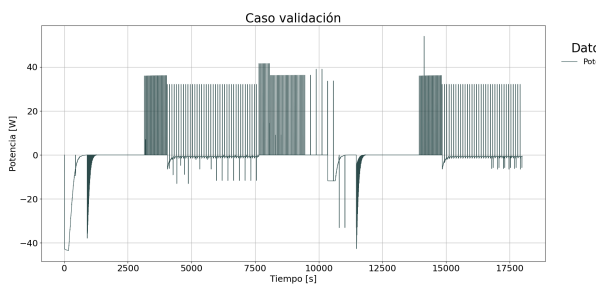


Figura 14: Potencia en función del tiempo para el ciclo de validación

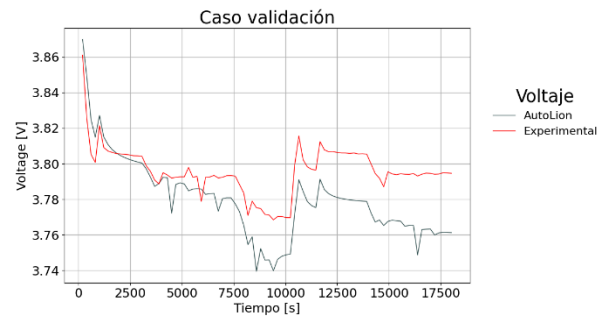


Figura 15: Respuesta de voltaje para el caso de validación.

Al observar la Figura 15 y Tabla 7 se observa que, si bien los indicadores no muestran grandes desviaciones, en el gráfico si se observan diferencias y offsets crecientes en el tiempo. Esto parece indicar que, al descargarse la celda, lo hace de forma más profunda que lo esperado, causando una diferencia entre gráficos que cada vez resulta mayor, aunque no resulta exagerada. A efectos prácticos, esto está fuertemente vinculado con lo visto anteriormente, donde pequeñas imprecisiones en la curva calibrada se van sumando y generan resultados como el aquí mostrado.

Sin embargo, se observa que las tendencias son bien respetadas y al cabo de casi 4 horas de uso simuladas, las diferencias no resultan mayores, por lo que el actual modelo resulta acorde para la simulación del escenario propuesto.

Tabla 7: Resumen de indicadores para validación.

Validación			
RMSE	Error medio	95th	$100 * \epsilon_{dch}$
0.0211	0.018	0.033	-10.0

Conclusiones

Se estableció una metodología estructurada y efectiva mediante la cual, a partir de una batería retirada de un vehículo eléctrico, es posible realizar una serie de ensayos experimentales que proporcionan los datos necesarios para calibrar un gemelo digital basado en un modelo electroquímico detallado.

El modelo calibrado logró reproducir con buena fidelidad el comportamiento dinámico de la celda en distintos regímenes de carga y demanda, resultando una herramienta útil para simular escenarios de alta exigencia. Las diferencias entre las curvas simuladas y experimentales se mantuvieron dentro de márgenes controlados, lo que lleva a concluir que la herramienta encuentra su uso en tareas de diseño, dimensionamiento y evaluación de sistemas de almacenamiento basados en baterías de segunda vida.

No obstante, los resultados también evidencian ciertas limitaciones del modelo hacia el final del proceso de descarga, especialmente en lo que refiere a la representación de los efectos difusivos. Esto resalta la necesidad de profundizar

en la calibración de los parámetros asociados al transporte de masa, así como en la implementación de un modelo térmico más preciso que permita capturar con mayor precisión y exactitud los fenómenos que se vuelven dominantes en condiciones de bajo estado de carga.

Referencias Bibliográficas

- Broussely, M. (2010). Battery requirements for HEVs, PHEVs, and EVs: An overview. Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53565-8.00013-0>
- Yang, L., Yu, B., Yang, B., Chen, H., Malima, G., & Wei, Y. M. (2021). Life cycle environmental assessment of electric and internal combustion engine vehicles in China. *Journal of Cleaner Production*, 285, 124899. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124899>
- Shahjalal, M., et al. (2021). A review on second-life of Li-ion batteries: Prospects, challenges, and issues. *Energy*, 241, 122881. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122881>

Garche, J., & Brandt, K. (2018). General overview of li-secondary battery safety issues. En *Electrochemical power sources: Fundamentals, systems, and applications Li-battery safety* (Vol. 5, pp. 127–141). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63777-2.00006-2>

Spek, E. J. (2018). *Safety of secondary-lithium batteries: An introduction*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63777-2.00005-0>

Car Info. (2016). Renault Kangoo Z.E. Express 22 kWh, 60hp, 2016. Recuperado de <https://www.car.info/en-se/renault/kangoo/kangoo-express-22-kwh-s-2016-9776860>

Gamma Technologies. (2020). *GT-SUITE: AutoLion application manual and calibration procedure*.

Iqbal, H., Sarwar, S., Kirli, D., Shek, J. K. H., & Kiprakis, A. E. (2023). A survey of second-life batteries based on techno-economic perspective and applications-based analysis.

Carbon Neutrality, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s43979-023-00049-5>

Chroma. (s.f.). *Battery cycler test systems*. Recuperado de <https://www.chromausa.com/automated-test-systems/battery/>

Newman, J. (2021). *Electrochemical systems*.

Financiación

El Proyecto fue desarrollado en el marco del proyecto ANII de Articulación ART_X_2023_1_179644.

30.-Productos naturales bioactivos y sus aplicaciones

Efecto de la estacionalidad en la actividad antifúngica del aceite esencial de *Mentha suaveolens* sobre *Candida albicans*; a través de un enfoque interdisciplinario

Autor: Bustos-Izquierdo, Rocío; rocio.bustos.i@ug.uchile.cl

Co-autor(es): Adorno Daniela, daniadorno@uchile.cl; Diaz-Dosque Mario, mrdiaz@uchile.cl; Jara-Sandoval José, jsandovalj@uchile.cl; Molina-Berrios Alfredo, aemolina@u.uchile.cl; Muñoz Daniela, daniela.munoz.roj@ug.uchile.cl; Santander Rocío, rocio.santander@usach.cl; Vallejos Thomas, thomy.vallejos@gmail.com.

Orientador/a: Molina-Berrios, Alfredo; aemolina@u.uchile.cl.

Universidad de Chile / Facultad de odontología, Instituto de ciencias odontológicas.

Resumen

Introducción. La candidiasis oral por *C. albicans*, es la infección fúngica más frecuente en humanos, pero su tratamiento muchas veces no es eficaz. En este contexto, los aceites esenciales surgen como alternativas terapéuticas, aunque su composición varía dependiendo de la estacionalidad al momento de la recolección de la planta. Este trabajo evaluó el efecto del aceite esencial de *Mentha Suaveolens* (AEM) obtenido en distintas estaciones del año sobre *C. albicans*.

Objetivo general. Evaluar la actividad antifúngica del AEM recolectado en distintas estaciones del año sobre *C. albicans*. Objetivos específicos. Determinar la composición química del AEM en diferentes estaciones del año. Evaluar el efecto del AEM sobre el crecimiento y morfogénesis de *C. albicans*.

Metodología. Se utilizó cepas de referencia ATCC 90029, 10231 y un aislado clínico de un paciente con estomatitis protésica (N°2024/030). El AEM se extrajo por hidrodestilación de *M. suaveolens* recolectada en octubre/2024, enero/2025 y abril/2025 (Lampa, región metropolitana) y fue caracterizado por GC-MS/MS. Se determinó la concentración inhibitoria mínima (CIM) por microdilución y el efecto sobre la morfogénesis mediante microscopía óptica. Análisis estadísticos (ANOVA y curva dosis-respuesta) con el programa GraphPad Prism 8.0.

Resultados. Mayor potencia antifúngica en AEM de primavera (CIM 0,03-0,1%v/v) y otoño (0,06-0,1%v/v) versus verano. El AEM inhibió significativamente la filamentación ($p < 0.05$). Los componentes mayoritarios fueron terpenos (carvona y pulegona). Las variaciones estacionales modificaron composición y actividad antifúngica. El AEM inhibió crecimiento y filamentación, representando una ventaja frente a tratamientos convencionales.

Palabras clave: Antifúngico, Aceite esencial, *Candida albicans*.

Introducción

Los hongos comprenden un reino de organismos eucariotas heterótrofos los cuales se pueden clasificar según distintas características como su morfología, su capacidad ecológica y su organización celular, diferenciándose en multicelulares como setas y mohos, y unicelulares como levaduras (Madigan, M. T. 2015). Estos últimos, a su vez, son organismos de gran diversidad taxonómica, metabólica, reproductiva y morfológica, lo cual le confiere distintas características que les permiten interactuar con el entorno. En particular, las levaduras del género *Candida* son organismos comensales oportunistas que pertenecen al filo Ascomycota (Spettel et al., 2019) y que forman parte de la microbiota normal de las mucosas humanas, incluyendo la boca, el tracto gastrointestinal y la vagina (Mishra et al., 2007). Sin embargo, bajo ciertas condiciones, como compromiso del sistema inmune, se podría generar un sobrecrecimiento de *Candida spp.* generando una infección local o sistémica; denominada candidiasis.

Así, la prevalencia de *Candida spp.* es mayor en personas embarazadas, diabéticas, ancianas y en aquellas que están recibiendo antibióticos o corticoides por largo tiempo donde se presenta una alteración homeostática del hospedero

como inmunosupresión, disbiosis y alteraciones metabólicas (McManus & Coleman., 2014). Las infecciones fúngicas provocan más de 1.5 millones de muertes al año a nivel mundial, posicionándose como una de las principales causas de mortalidad en la población humana (Bongomin et al., 2017). Entre ellas, la candidiasis oral es la enfermedad fúngica más común, experimentando un preocupante aumento en su prevalencia en los últimos años, siendo una de las principales causas de morbilidad y mortalidad en hospederos inmunocomprometidos (Darwazeh & Darwazeh., 2014).

La candidiasis oral es producida por especies del género *Candida*, siendo *Candida albicans* la más prevalente, aunque también se han identificado otras especies en menor medida, como *C. dubliniensis*, *C. glabrata*, *C. guilliermondii*, *C. krusei*, *C. lusitaniae*, *C. parapsilosis* y *C. tropicalis* (Mishra et al., 2007).

Si bien se estima que hasta el 80% de la población posee *C. albicans* en la cavidad oral como parte de su microbiota normal (Vila et al., 2020), en condiciones de disbiosis o inmunosupresión, *C. albicans* puede volverse altamente virulenta y patogénica, siendo responsable del 95% de los casos de candidiasis oral (Vila et

al., 2020). Debido a su capacidad de adaptación al hospedero, cualquier alteración en el microambiente que favorezca su proliferación puede permitirle invadir múltiples tejidos. En este sentido, si la candidiasis oral no es tratada oportunamente existe el riesgo de que evolucione a una candidiasis invasiva diseminada o candidiasis invasiva profunda, comprometiendo diversos órganos y representando una amenaza significativa para la salud (Vila et al., 2020).

La infección por *C. albicans* puede presentarse como lesiones blancas o eritematosas distribuidas en la mucosa bucal, orofaringe, paladar duro y/o blando, lengua, entre otros. Las lesiones blancas pueden clasificarse como candidiasis pseudomembranosa o candidiasis hiperplásica crónica; y las lesiones rojas pueden atribuirse a la candidiasis eritematosa aguda o crónica, queilitis angular, glositis romboidal media y eritema gingival lineal (Taylor et al., 2024). La forma en que se encuentra con mayor frecuencia en la población es la candidiasis eritematosa crónica, también conocida como estomatitis protésica. Ésta se presenta como un enrojecimiento de la mucosa subyacente a un aparato protésico removible, y se asocia a una higiene oral inadecuada, el uso continuado de prótesis y la presencia de

prótesis dentales mal ajustadas.

C. albicans es una especie dimórfica capaz de crecer en forma de levadura o en formas filamentosas. Así, es una de las únicas dos especies de *Candida* capaces de formar hifas verdaderas, junto con *Candida dubliniensis*. Se considera que las hifas desempeñan un papel importante en el proceso de formación de biopelículas, especialmente en la etapa de la adhesión e invasión tisular (McManus & Coleman., 2014).

En relación con esto, una de las principales características asociadas a la virulencia, recurrencia y resistencia de *C. albicans* es su capacidad para formar biopelículas (Wall et al., 2019). Una biopelícula se define como una comunidad microbiana estructurada, unida por una matriz extracelular protectora que crece adherida a una superficie biótica o abiótica. Estas biopelículas pueden estar formadas por una sola especie o por un cultivo mixto de bacterias y levaduras (Malinovská et al., 2023). Las biopelículas pueden iniciar o propagar infecciones ya que proporcionan un ambiente tal, que genera resistencia al tratamiento y que permite a las células invadir los tejidos locales mientras generan nuevos focos de infección (Malinovská et al., 2023).

Tradicionalmente, se ha propuesto que el proceso de formación de biopelículas se

produce en cuatro etapas principales (Gulati & Nobile, 2016; Talapko et al., 2021). La primera etapa corresponde a la etapa de adhesión, en la que células aisladas en forma de levadura se adhieren a una superficie biótica o abiótica para formar una capa basal de células. La adhesión es mediada por adhesinas, glicoproteínas ubicadas en la pared celular, que permiten que las células se adhieran a superficies inertes como agar o plástico y tejidos del hospedero como las mucosas (Malinovská et al. 2023). La siguiente etapa corresponde a la proliferación, donde las células comienzan a crecer y cambiar su morfología transitando de levadura a hifa. En esta etapa *C. albicans* secreta una batería de enzimas hidrolíticas, como proteinasas, hemolisinas y fosfolipasas, que permiten al hongo invadir el tejido del hospedero u otros sustratos sólidos (Pereira et al., 2021). Luego viene la etapa de maduración de la biopelícula, donde se produce la secreción de sustancias poliméricas extracelulares que dan lugar a una compleja red de varias células polimórficas (hifales, pseudohifales y levaduriformes) que confieren a la biopelícula un aspecto grueso, además de propiciar una integridad estructural frente a lesiones químicas y físicas (Gulati & Nobile, 2016), formando la matriz extracelular. Finalmente, la etapa de dispersión de células levaduriformes no

adherentes, que se liberan desde la biopelícula madura y pueden colonizar otras superficies (Wall et al., 2019), es de gran importancia clínica ya que las células liberadas de la biopelícula madura pueden no sólo iniciar nuevos ciclos de formación de biopelículas, sino también entrar en el torrente sanguíneo para establecer un foco de infección (Pereira et al., 2021; Tsui et al., 2016). Por lo tanto, el estudio de cada etapa en la formación de biopelículas es fundamental para avanzar en la comprensión y tratamiento de las infecciones por *Candida spp.*

El manejo terapéutico de la candidiasis oral actualmente recae sobre dos familias de fármacos; los polienos y los azoles. Los polienos, como la nistatina y la anfotericina, ejercen una acción fungicida al unirse al ergosterol, un componente esencial de la membrana fúngica, formando poros que provocan la pérdida de integridad celular y, finalmente, la muerte celular (Perfect., 2017). Sin embargo, la nistatina se usa casi exclusivamente para la candidiasis orofaríngea en forma de suspensión oral y su eficacia es limitada debido a la aparición de cepas resistentes, mientras que la anfotericina B es un antifúngico de amplio espectro utilizado principalmente para infecciones sistémicas, pero su eficacia se ve afectada por la toxicidad renal que induce (Quindós et al., 2019).

Por otro lado, los azoles, el grupo de antifúngicos más utilizados, inhiben la 14 α -desmetilasa, una enzima clave en la biosíntesis de ergosterol, afectando el crecimiento fúngico y la permeabilidad de la membrana, teniendo así una acción fungistática (Perfect., 2017). En esta categoría se encuentran el gel oral de miconazol y el fluconazol sistémico por vía oral. Sin embargo, se han descrito varios mecanismos de resistencia a los azoles que incluyen: alteraciones en la estructura química de la enzima desmetilasa (blanco terapéutico), expresión de bombas transportadoras de múltiples fármacos que eliminan los azoles, y la compensación por otras enzimas de síntesis de esteroides en la biosíntesis de membrana (Lewis & Williams., 2017). Además, se han descrito altas tasas de recurrencia de la infección fúngica relacionadas al uso de azoles que no poseen actividad antibiopelícula (Telles et al., 2017) como el fluconazol, el cual presenta una eficacia limitada a largo plazo (Rodrigues et al., 2019; Millsop & Fazel., 2016). Estudios in vitro han demostrado que la resistencia al fluconazol puede aumentar más de 1000 veces y reducir su eficacia en un 50% contra las biopelículas de *C. albicans* (Tobudic et al., 2012).

En este contexto, debido a la creciente resistencia de los patógenos, la toxicidad de los antifúngicos disponibles y la falta de

tratamientos eficaces contra la formación de biopelículas, es que se ha impulsado la búsqueda de nuevas estrategias para inhibir biopelículas y potenciar los antifúngicos convencionales contra *Candida spp.* Así es que, diversos estudios han propuesto que los productos naturales derivados de plantas representan una opción prometedora para el tratamiento de infecciones relacionadas con levaduras del género *Candida* (Bu et al., 2022; Soliman et al., 2017).

Entre los productos naturales, los aceites esenciales (AE) han sido un foco principal de atención debido a su potente actividad antifúngica (Karpiński et al., 2023; Ruiz-Duran et al., 2023). Los AE son un fluido lipofílico compuesto por moléculas volátiles complejas de bajo peso molecular (<500 Da), que son sintetizadas por las plantas como metabolitos secundarios. En general, están constituidos por entre 20 y 100 metabolitos secundarios de diverso origen químico; sin embargo, los componentes principales se dividen en dos clases químicas distintas: los terpenos y los fenilpropanoides que tienen efectos antioxidantes y antiinflamatorios; y los ésteres que son menos frecuentes y contribuyen a la fragancia de los AE (Moghaddam & Mehdizadeh., 2017; Sharifi-Rad et al., 2017). La composición de los AE depende de una serie de

factores relacionados con la planta que los produce, principalmente, ubicación geográfica, eco tipo o variedad, propiedades biológicas y fisicoquímicas del suelo, nutrición, uso de fertilizantes y variaciones estacionales (Bona et al., 2016).

Los AE se pueden extraer de las hojas, flores, frutos, semillas, raíces, tallos y la madera de las plantas (Bona et al., 2016), y hay una serie de métodos y técnicas disponibles para ello. Entre los más usados encontramos la hidrodestilación. Un método simple y de bajo costo en comparación con otros métodos. El proceso consiste en llevar a ebullición la mezcla de material vegetal y agua, lo que provoca la desintegración de la pared celular y la liberación de los aceites, los que se transportan junto con el vapor de agua a una parte separada para enfriar y condensar la mezcla de vapor de agua y aceite, que fluye hasta un separador donde el aceite y los compuestos bioactivos se separan por la polaridad del agua. Finalmente, el AE obtenido se recolecta y almacena a baja temperatura (Ahmad Nayik & Javed Ansari., 2023; Colina-Márquez et al., 2022).

Es pertinente mencionar que la obtención de AE presenta ciertas limitaciones. Como se mencionó anteriormente, la composición de los AE está influenciada

por las condiciones climáticas, ya que los metabolitos secundarios son producidos por las plantas aromáticas para superar algunas amenazas ambientales. Así, la estación del año en la que se recoge el material vegetal impacta directamente en la producción y composición del aceite AE (Fernández-Sestelo & Carrillo., 2020; Mehalaine & Chenchouni., 2020).

Por lo tanto, es necesario caracterizar químicamente los AE bajo diferentes condiciones climáticas para determinar cuál es la composición química óptima para la actividad biológica en evaluación. Esto debe integrarse con los resultados de los perfiles farmacológicos para determinar la mejor estación o condiciones climáticas para la extracción de AE. También es importante establecer un protocolo para el método de extracción y las partes de la planta que serán utilizadas, ya que esto puede impactar en la potencia y efectividad de los AE (Kapadia et al., 2022).

Varios autores han descrito que los AE de diferentes plantas podrían ser una alternativa para el desarrollo de nuevos agentes con actividad antifúngica (Loaiza-Oliva et al., 2022; Shala et al., 2022). En este contexto, trabajos recientes reportaron los efectos antifúngicos y antibiopelícula de los AE obtenidos de *Lavandula dentata* y

Origanum vulgare contra diferentes especies de *Candida*, incluyendo cepas de referencia y aislados clínicos (Cid-Chevecich et al., 2022; Müller-Sepúlveda et al., 2020). Ambos AE fueron capaces de inhibir el crecimiento de la forma planctónica de las levaduras. Además, inhibieron características que contribuyen a la virulencia, como la filamentación, adhesión y viabilidad de la biopelícula. De manera destacable, el AE de *O. vulgare* también potenció los efectos de antifúngicos convencionales, como el fluconazol y la nistatina (Cid-Chevecich et al., 2022).

Adicionalmente, estudios preliminares del laboratorio de Farmacología muestran un efecto antibiopelícula del aceite esencial de *Mentha suaveolens* (AEM) en cepas de referencia de *C. albicans*.

M. suaveolens es utilizado ampliamente en medicina mediterránea, y dentro de sus aplicaciones se encuentran sus efectos hipotensivos, antiespasmódicos, antimicrobianos, entre otros (Božović et al., 2015). Esta planta también es reconocida por sus favorables propiedades organolépticas, como su sabor afrutado y mentolado, lo que representa una característica deseable para la administración de AE en la cavidad oral (Afrokh et al., 2024). Teniendo en cuenta lo anterior, *M. suaveolens* se

presenta como un candidato ideal para investigar sus propiedades antifúngicas en afecciones que comprometen la mucosa oral. Este estudio se aborda desde una perspectiva interdisciplinaria, integrando enfoques disciplinarios de química, microbiología y farmacología. Por un lado, la disciplina de la microbiología nos permite caracterizar y evaluar las distintas cepas y aislados clínicos de *C. albicans*, la farmacología nos permite relacionar la actividad de los aceites esenciales sobre *C. albicans* y finalmente, a través de la química relacionamos la composición de los aceites con su actividad antifúngica. Esto nos permite contar con diversas herramientas metodológicas y analíticas para obtener una comprensión integral del efecto antifúngico de *M. suaveolens*.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar la actividad antifúngica del AEM recolectado en distintas estaciones del año sobre *C. albicans*.

Objetivos específicos

1. Determinar la composición química del aceite esencial de *M. suaveolens* en diferentes estaciones del año.
2. Evaluar el efecto del AEM sobre el crecimiento y morfogénesis de *C. albicans*.

Materiales y métodos

Fármacos.

Como control se utilizó un fármaco ampliamente aceptado en el tratamiento de la candidiasis; fluconazol (Sigma-aldrich, F8929-100mg) utilizando un rango de concentraciones de 0.01-10 mg/L. El fármaco fue diluido primero en DMSO y posteriormente en RPMI para obtener una concentración final de DMSO de 0.5–1.0% en cada pocillo.

Plantas y aceites esenciales.

Para la extracción del AE se utilizó las partes aéreas; incluyendo hojas y tallos de la planta *Mentha suaveolens*, donadas por la compañía “De Nuestra Tierra”. Éstas fueron recolectadas en distintas estaciones del año (octubre;primavera, enero;verano, abril; otoño,) para evaluar la variabilidad en el contenido y composición del AE. De este modo, se contó con tres lotes de AE, los cuales se extrajeron por hidrodestilación y fueron almacenados a -20°C hasta su uso. La caracterización química se realizó según lo descrito previamente (Müller-Sepúlveda et al., 2020; Wińska et al., 2019). Los AE se diluyeron en diclorometano, para luego analizar estas muestras por Gas Chromatography-Tandem Mass Spectrometry (GC-MS/MS) servicio ubicado en Departamento de Ciencias del Ambiente, Facultad de Química y Biología,

Universidad de Santiago de Chile. Los resultados obtenidos en la caracterización de los aceites fueron comparados con la base de datos “NIST14 library” y fueron contrarrestados con datos publicados en la literatura.

Cepas y aislado clínico de *C. albicans*.

Se utilizó una cepa de referencia susceptible al fluconazol *C. albicans* ATCC 90029 y una cepa de referencia resistente al fluconazol *C. albicans* ATCC 10231. El aislado clínico fue aislado de un paciente diagnosticado con estomatitis protésica en la clínica de medicina oral de la Facultad de Odontología de la Universidad de Chile, al cual se le otorgó un consentimiento informado para participar en el estudio (protocolo de estudio N°2024/030 – acta N°2024/024 aprobado por el Comité Ético Científico de la Facultad de Odontología de la Universidad de Chile, Fondecyt Regular 1241130). La muestra fue recolectada por la Dra. Daniela Adorno (co-investigadora proyecto FONDECYT 1241130), patóloga oral de la clínica de medicina oral mediante un hisopado de la mucosa oral. El aislado clínico obtenido se aisló mediante siembra en placas de Agar Sabouraud con cloranfenicol (0.5 g/L) (Biokar), donde pudimos destacar características como su forma circular y lisa, color blanco o cremoso, su textura pastosa y bordes definidos (Hamid et al., 2014).

Mantenimiento de cultivo de *C. albicans*.

Las cepas de *C. albicans* se mantuvieron en placas de Agar Sabouraud con cloranfenicol (0.5 g/L) (Biokar). Para los ensayos, se preparó un preinóculo del aislado clínico o cepa de referencia de *C. albicans* a utilizar en los ensayos respectivos a partir de una colonia única (1–2 mm de diámetro) en medio RPMI-1640 bajo condiciones de crecimiento planctónico a 28°C, en aerobiosis sin agitación. Después de 18-20 h, se ajustó una suspensión celular estandarizada a la concentración requerida para cada ensayo, con o sin suplementación de suero fetal bovino (FBS) (10% v/v) (Gibco).

Recuento de *C. albicans*.

Para los ensayos, se estandarizó una suspensión de unidades formadoras de colonia (UFC) por mililitro, de acuerdo con los requerimientos experimentales. La cuantificación de células totales se realizó a partir de un preinóculo previamente preparado de cepas de referencia y el aislado clínico de *C. albicans* según correspondía. El recuento celular se realizó mediante un contador automático LUNA-FL, ubicado en Laboratorio de Farmacología, que mediante microscopía de campo claro proporciona el número total de células en la muestra.

Concentración inhibitoria mínima (CIM) - método de microdilución.

La CIM corresponde a la menor concentración de antifúngico que inhibe el crecimiento de un microorganismo en un periodo definido de tiempo, expresándose en mg/L. Dicho método se utiliza como referencia para las pruebas de sensibilidad antimicrobiana y se usan principalmente para definir la actividad de los nuevos antifúngicos a partir de la concentración a la cual el antifúngico inhibe el 50% del crecimiento de las levaduras (IC50).

Se realizó en una placa de 96 pocillos, donde se incubó 100 uL de una suspensión celular estandarizada a 500.000 UFC/mL de *C. albicans* en medio RPMI-1640, junto con los AE en distintas concentraciones y los controles correspondientes, alcanzando un volumen total de 200 uL. Se incubó a 37°C por 24 h, en aerobiosis sin agitación. Posteriormente, se leyó la placa por densidad óptica a 540 nm de longitud de onda en un lector de placas (Infinite-F50, Tecan). El valor del blanco, que corresponde a medio RPMI-1640 solo, se restó a la lectura del resto de pocillos. Adicional a esto por cada ensayo se realizó una curva control donde se comparó el efecto de los AE fluconazol. El vehículo utilizado; dimetilsulfóxido (DMSO), se utilizó como control. Finalmente, a través de una curva

dosis-respuesta, se determinó el IC50 de cada lote de AE probado. El ensayo se realizó por triplicado en tres experimentos independientes para cada cepa y cada lote de aceite.

Ensayo de Morfogénesis.

La formación de células filamentosas e hifas es un proceso clave para el desarrollo de la biopelícula y su invasividad. Por esta razón, se llevó a cabo un ensayo en condiciones que favorecen la filamentación de *C. albicans* tanto en ausencia como en presencia del AE. El objetivo es evaluar si el AE puede interferir en el proceso de formación de células filamentosas. Para ello se cuantificó el porcentaje de células filamentosas mediante microscopía óptica, esperando que el AE redujera la presencia de estas células. Para este ensayo se utilizó la IC50, y el 50% de la IC50 obtenida en el ensayo de CIM para cada lote de aceite. El efecto del aceite se comparó con fluconazol. El vehículo utilizado; dimetilsulfóxido (DMSO), se utilizó como control.

Se realizó en tubos Eppendorf, donde se incubó 100 uL de una suspensión celular estandarizada de *C. albicans* a 1.000.000 UFC/ml en medio RPMI-1640 más FBS (10% v/v) (Gibco), junto con la concentración de AE obtenida para la IC50, el 50% de esta y los controles correspondientes, alcanzando un volumen

total de 200 ul. La incubación de las placas fue a 37°C por 4 h en aerobiosis con agitación a 100 rpm, para inducir la morfogénesis. Posteriormente, se contabilizó las células hifales y planctónicas, las cuales se expresaron como el porcentaje del número total de células mediante recuento por microscopía óptica en una cámara de Neubauer. El ensayo se realizó por triplicado en tres experimentos independientes para cada cepa y cada lote de aceite.

Análisis de los datos.

Para el análisis de los datos obtenidos, se hizo comparaciones con el programa "GraphpadPrism v8" usando análisis estadísticos paramétricos o no paramétricos dependiendo de los resultados del análisis de normalidad de los datos. Para determinar el cumplimiento de los supuestos de ANOVA, se utilizó el test de normalidad de Shapiro-Wilk, el test de homocedasticidad de varianzas de Levene y el test para valores atípicos de Grubbs. Si se cumplían los supuestos, se llevó a cabo un ANOVA de dos vías y el test de comparaciones múltiples de Tukey. En caso contrario, los datos se transformaron o se utilizaron test no paramétricos, tales como Kruskal Wallis y comparaciones múltiples de Dunn, o test de Welch y comparaciones múltiples de Games-Howell. Para determinar el IC50

de cada lote del AE, se realizó un análisis de dosis-respuesta. Los datos fueron transformados logarítmicamente y ajustados a una curva no lineal de dosis-respuesta de cuatro parámetros, lo que permitió estimar con precisión la concentración inhibitoria media de cada muestra.

Resultados y Discusión

Ensayos de concentración inhibitoria mínima muestran que el AEM extraído en primavera y otoño tienen un efecto más potente sobre *Candida albicans* que el AEM extraído en verano.

Con el objetivo de determinar la concentración que inhibe el 50% (IC50) del crecimiento de *C. albicans*, se realizó ensayos de microdilución utilizando cultivos planctónicos expuestos a distintas

concentraciones del AEM, obteniendo curvas dosis-respuesta para cada AEM extraído en las distintas estaciones.

En la cepa susceptible a fluconazol (Figura 1A), el AEM de primavera y otoño tuvo un efecto más potente en comparación con el AEM de verano, mostrando diferencias estadísticamente significativas (Tabla 1). En la cepa resistente a fluconazol (Figura 1B), se observó que el AEM de primavera tuvo un efecto más potente sobre la inhibición del crecimiento en comparación a la menta de verano y otoño, mostrando diferencias estadísticamente significativas (Tabla 1). En el caso del aislado clínico, el AEM de primavera y otoño tuvo un efecto más potente en comparación con el AEM de verano, mostrando diferencias estadísticamente significativas (Tabla 1).

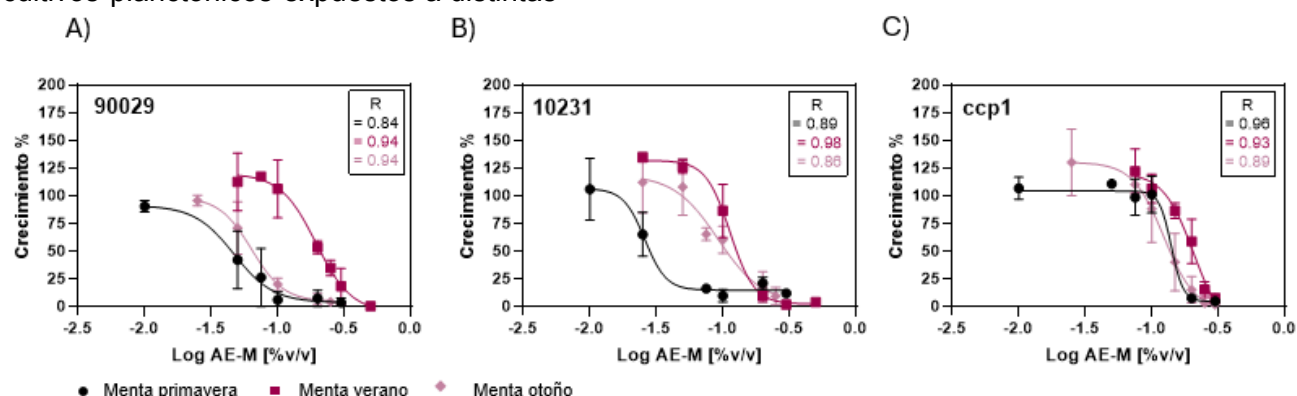


Figura 1. Actividad antifúngica del aceite esencial de menta (AEM) extraído en distintas estaciones contra *Candida albicans*. Se obtuvieron curvas dosis-respuesta a partir del cultivo de levaduras planctónicas expuestas a diferentes concentraciones de AEM durante 24 horas a 37 °C. Las curvas representan el promedio de tres réplicas biológicas por triplicado. Se realizó un análisis dosis-respuesta en el programa Graphpad prism para obtener el IC50.

Tabla 1. IC50 obtenido a partir de la concentración inhibitoria mínima de aceite esencial de menta contra *Candida albicans*

Compuesto	Cepa 90029 (IC50 %)	Cepa 10231 (IC50 %)	Aislado clínico ccp1 (IC50 %)
Menta de primavera	0,05 ± 0,01 ****	0,03 ± 0,02 * ▽	0,1 ± 0,01 **
Menta de verano	0,2 ± 0,02	0,1 ± 0,02	0,2 ± 0,01
Menta de otoño	0,06 ± 0,01 ****	0,09 ± 0,03	0,12 ± 0,02 +++
Fluconazol	0.25 ± 0,01 mg/L	No determinado	No determinado

Resultado expresado como el promedio (%v/v) de tres replicas biológicas por triplicado ± la desviación estándar. Se representan diferencias significativas entre primavera y verano donde p<0,05 (*), p<0,01 (**), y p<0,0001 (****). Entre verano y otoño donde p<0,001 (+++) y p<0,0001 (++++). Y entre primavera y otoño donde p<0,05 (▽).

De esta forma podríamos evidenciar que tanto el AEM de otoño, verano y primavera tienen un efecto sobre la inhibición del crecimiento de *C. albicans*

teniendo el AEM de primavera y otoño la actividad más potente.

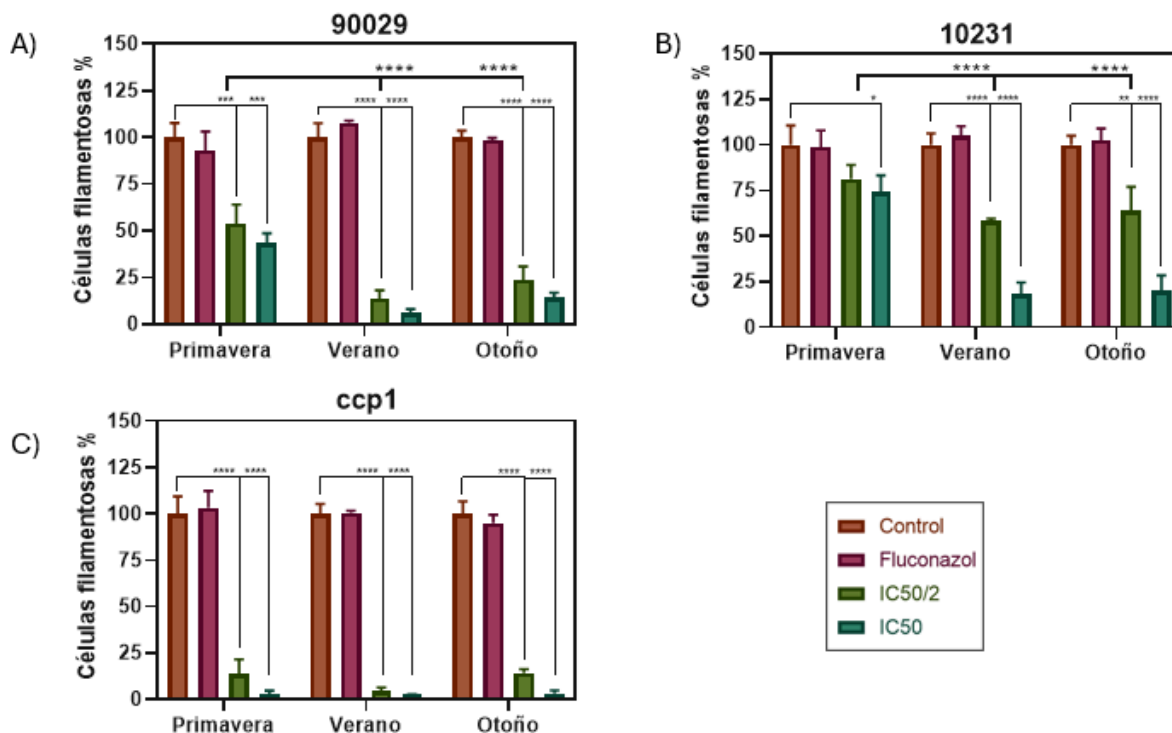


Figura 2. Inhibición de la filamentación de *Candida albicans* por el aceite esencial de menta extraído en distintas estaciones. El proceso de filamentación fue inducido en ausencia y presencia de los distintos tratamientos a su concentración inhibitoria mínima (CIM) obtenida previamente y la mitad de esta. Adicionalmente se utilizó fluconazol. Luego, las células fueron observadas mediante microscopía óptica. Los resultados fueron expresados como el promedio de tres réplicas biológicas por triplicado. Se presentan diferencias significativas, donde $p < 0.0001$ (****), $p < 0.001$ (***), $p < 0.01$ (**), $p < 0.5$ (*) a partir de un análisis ANOVA de una vía intra-estación y de dos vías inter-estación en el programa Graphpad prism. Las barras representan el promedio y la desviación estándar.

Según lo reportado en la literatura la actividad de los aceites esenciales puede variar según el espécimen vegetal, el método de extracción, las partes de la planta utilizadas, la estación de recolección del material y otros factores (Loaiza-Oliva et al., 2022; Bona et al., 2016). Esto dificulta la estandarización de la potencia y eficacia por lo que es fundamental seleccionar la estación adecuada de la recolección del material vegetal según nuestro objetivo de estudio.

Ensayos de morfogénesis evidenciaron una inhibición en la filamentación de *Candida albicans* con los AEM ensayados.

Con el objetivo de evaluar el efecto del AEM sobre la morfogénesis de *C. albicans*, se realizó un ensayo de filamentación mediante microscopía óptica, utilizando las concentraciones correspondientes al IC50 y su mitad, previamente determinadas por

microdilución.

En la cepa susceptible a fluconazol (Figura 2A), el AEM obtenido una inhibición significativa de la filamentación respecto al control, siendo este efecto más marcado el AEM de verano y otoño, los cuales presentaron diferencias estadísticamente significativas en comparación con el AEM de primavera. De manera similar, en la cepa resistente a fluconazol (Figura 2A), los tres AEM produjeron una inhibición en la filamentación, destacando nuevamente el AEM de verano y otoño por su mayor eficacia en comparación con el AEM de primavera. En el caso del aislado clínico, los tres AEM provocaron una inhibición significativa de la filamentación respecto al control, sin mostrar diferencias significativas entre los AEM.

altas concentraciones que conducen a la muerte celular, y la desestabilización de microtúbulos lo que provoca alteraciones morfológicas (Cid-Chevecich, C., et al., 2022; Zinnat Shahina et al. 2022; Zinnat Shahina et al., 2023). Este último mecanismo resulta particularmente relevante para nuestro estudio, ya que nuestros hallazgos han demostrado que el AEM inhibe la filamentación de *C. albicans*, proceso íntimamente ligado a cambios morfológicos significativos. Dado que la filamentación constituye una etapa clave en la formación de biopelículas, la capacidad del AEM para interferir en este proceso resalta su potencial terapéutico como una alternativa prometedora contra infecciones fúngicas.

Tabla 2. Componentes detectados en caracterización por GC-MS de aceite esencial de menta de primavera, verano y otoño

Nombre compuesto	% Área menta de primavera	% Área menta de otoño	% Área menta de verano	IK exp
<u>(-)-Carvona</u>	68.56	21.31	46.72	1246.680443
<u>Pulegona</u>	No identificado	29.3	15.71	1242.501636
<u>D-limoneno</u>	5.58	2.3	2.79	1025.489558
<u>Germanocrona D</u>	4.09	3.93	3.12	1489.314123
<u>Sin identificar</u>		18.98		

Diversos estudios han reportado que los aceites esenciales presentan múltiples mecanismos de acción antifúngica. Entre ellos se encuentran la inhibición de la adhesión celular, la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) a

La caracterización química por Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS) muestra que los componentes mayoritarios del aceite esencial corresponden a familias de terpenos.

Tras el análisis de los resultados pudimos notar que todos los componentes principales corresponden a terpenos (Tabla 2.), como monoterpenos, monoterpenoides y sesquiterpenos.

El principal componente, observado en el AEM extraído en las distintas estaciones fue la carvona, representando casi el 50% de la composición del aceite en algunos casos, o más, en el caso del AEM de primavera. Sin embargo, notamos que el segundo componente mayoritario fue la pulegona, la cual se encuentra tanto en menta de verano como otoño, pero no en primavera, lo que podría dar cuenta de la diferencia en su efecto contra *C. albicans*.

Al comparar los resultados que obtuvimos en la caracterización química con la literatura notamos que nuestros resultados son consistentes ya que se ha reportado que el AEM presenta como componentes mayoritarios la pulegona, óxido de piperitenona (PEO) y óxido de piperitona (PO), los cuales se presentan en distintas cantidades, además de otros productos aromáticos como carvona, limoneno y mentona. (H Oumzil.et al., 2002; Božović et al., 2015).

Conclusiones

El AE *Mentha suaveolens* demuestra un destacado potencial terapéutico contra *Candida albicans*, al inhibir tanto su crecimiento como su filamentación, una de las principales limitaciones de los tratamientos antifúngicos convencionales. Esta actividad antifúngica varía según la estación del año, debido a cambios en su composición química. El AEM recolectado en primavera presenta la mayor potencia inhibitoria del crecimiento, mientras que los AEM de verano y otoño, ricos en pulegona, se asocian con una mayor inhibición de la filamentación. Estos hallazgos evidencian que la eficacia del AEM puede optimizarse estratégicamente seleccionando la estación de recolección más adecuada. En este caso los AEM obtenidos en otoño y verano poseen una mayor actividad contra la filamentación, por lo que son una prometedora alternativa natural contra biopelículas de *C. albicans*. Finalmente, es importante destacar que un enfoque interdisciplinario nos permite abordar de manera más integral la evaluación de nuevas alternativas terapéuticas para el tratamiento de infecciones altamente frecuentes en la población, como es el caso de la estomatitis protésica que afecta de manera importante a la población de adultos mayores.

Referencias Bibliográficas

1. Afrokh, M., et al. (2024). Quality criteria, chemical composition and antimicrobial activity of the essential oil of *Mentha suaveolens* Ehrh. *Heliyon*, 10(7), e28125. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28125>
2. Ahmad Nayik, G., & Javed Ansari, M. (2023). *Essential Oils*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2021-0-01279-7>
3. Bona, E., et al. (2016). Sensitivity of *Candida albicans* to essential oils: are they an alternative to antifungal agents? *Journal of Applied Microbiology*, 121(6), 1530–1545. <https://doi.org/10.1111/jam.13282>
4. Bongomin, F., et al. (2017). Global and Multi-National Prevalence of Fungal Diseases-Estimate Precision. *Journal of Fungi (Basel)*, 3(4), 57. <https://doi.org/10.3390/jof3040057>
5. Božović, M., Pirolli, A., & Ragno, R. (2015). *Mentha suaveolens* Ehrh. Essential Oil and Its Main Constituent Piperitenone Oxide: Biological Activities and Chemistry. *Molecules*, 20(5), 8605–8633. <https://doi.org/10.3390/molecules20058605>
6. Bu, Q. R., et al. (2022). Targeting Virulence Factors of *Candida albicans* with Natural Products. *Foods*, 11(19), 2951. <https://doi.org/10.3390/foods11192951>
7. Cid-Chevecich, C., et al. (2022). *Origanum vulgare* L. essential oil inhibits virulence patterns of *Candida* spp. *BMC Complement Med Ther*, 22(1), 39. <https://doi.org/10.1186/s12906-022-03518-z>
8. Colina-Márquez, J. Á., et al. (2022). Comparación de dos métodos de extracción para el aceite esencial de la cáscara de pomelo. *Revista Ing-Nova*, 1(1), 85–98. <https://doi.org/10.32997/rin-2022-3729>
9. Darwazeh, A. M. G., & Darwazeh, T. A. (2014). What Makes Oral Candidiasis Recurrent Infection? A Clinical View. *Journal of Mycology*, 2014, 1–5.
10. Fernández-Sestelo, M., & Carrillo, J. M. (2020). Environmental Effects on Yield and Composition of Essential Oil in Wild Populations of Spike Lavender (*Lavandula latifolia* Medik.). *Agriculture*, 10(12), 626. <https://doi.org/10.3390/agriculture10120626>
11. Gulati, M., & Nobile, C. J. (2016).

- Candida albicans* biofilms: development, regulation, and molecular mechanisms. *Microbes and Infection*, 18(5), 310–321. <https://doi.org/10.1016/j.micinf.2016.01.002>
12. Kapadia, P., et al. (2022). Extraction of High-Value Chemicals from Plants. *Int J Mol Sci*, 23(18), 10334. <https://doi.org/10.3390/ijms231810334>
13. Karpiński, T. M., et al. (2023). Anti-*Candida* and Antibiofilm Activity of Selected Lamiaceae Essential Oils. *Front Biosci*, 28(2), 28. <https://doi.org/10.31083/j.fbl2802028>
14. Lewis, M. A. O., & Williams, D. W. (2017a). Diagnosis and management of oral candidosis. *Br Dent J*, 223(9), 675–681. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2017.886>
15. Loaiza-Oliva, M., et al. (2022). The Cytotoxic and Inhibitory Effects of Plant Derivatives on *Candida albicans* Biofilms. *Molecules*, 28(1), 130. <https://doi.org/10.3390/molecules28010130>
16. Madigan, M. T. (2015). *Brock: Biología de los microorganismos*. Pearson Education.
17. Malinovská, Z., et al. (2023). Biofilm Formation in Medically Important *Candida* Species. *J Fungi*, 9(10), 955. <https://doi.org/10.3390/jof9100955>
18. McManus, B. A., & Coleman, D. C. (2014). Molecular epidemiology of antifungal resistance. *Infect Genet Evol*, 21, 166–178. <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2013.11.008>
19. Mehalaine, S., & Chenchouni, H. (2020). Effect of Climatic Factors on Essential Oil Accumulation in Two Lamiaceae Species from Algerian Semiarid Lands. In *Advances in Science, Technology and Innovation* (pp. 57–60). Springer Nature.
20. Millsop, J. W., & Fazel, N. (2016). Oral candidiasis. *Clinics in Dermatology*, 34(4), 487–494. <https://doi.org/10.1016/j.clindermatol.2016.02.022>
21. Mishra, N. N., et al. (2007). Pathogenicity and drug resistance in *Candida albicans* and other yeast species. *Acta Microbiol Immunol Hung*, 54(3), 201–235. <https://doi.org/10.1556/AMicr.54.2007.3.1>
22. Moghaddam, M., & Mehdizadeh, L. (2017). Chemistry of Essential Oils. In *Soft Chemistry and Food Fermentation* (pp. 379–419). Elsevier.

23. Müller-Sepúlveda, A., et al. (2020). Chemical Characterization of *Lavandula dentata* Essential Oil. *Planta Med*, 86(16), 1225–1234. <https://doi.org/10.1055/a-1201-3375>
24. Oumzil, H., Ghouami, S., Rhajaoui, M., Ildrissi, A., Fkih-Tetouani, S., Faid, M., & Benjouad, A. (2002). Antibacterial and antifungal activity of essential oils of *Mentha suaveolens*. *Phytotherapy Research: PTR*, 16(8), 727–731. <https://doi.org/10.1002/ptr.1045>
25. Perfect, J. R. (2017). The antifungal pipeline: a reality check. *Nat Rev Drug Discov*, 16(9), 603–616. <https://doi.org/10.1038/nrd.2017.46>
26. Pereira, R., et al. (2021). Biofilm of *Candida albicans*: formation, regulation and resistance. *J Appl Microbiol*, 131(1), 11–22. <https://doi.org/10.1111/jam.14949>
27. Quindós, G., et al. (2019). Therapeutic tools for oral candidiasis: current and new antifungal drugs. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal*, 24(2), e172–e180. <https://doi.org/10.4317/medoral.22978>
28. Rodrigues, C. F., et al. (2019). *Candida sp.* Infections in Patients with Diabetes Mellitus. *J Clin Med*, 8(1), <https://doi.org/10.3390/jcm8010076>
29. Ruiz-Duran, J., et al. (2023). Antifungal and Antibiofilm Activity of Colombian Essential Oils. *Antibiotics*, 12(4), 668. <https://doi.org/10.3390/antibiotics12040668>
30. Shala, A., et al. (2022). Essential Oils as Alternative Promising Anti-Candidal Agents. *Curr Pharm Des*, 28(1), 58–70. <https://doi.org/10.2174/1381612827666210914124344>
31. Soliman, S., et al. (2017). Plants' Natural Products as Alternative Promising Anti-Candida Drugs. *Pharmacogn Rev*, 11(22), 104–122. https://doi.org/10.4103/phrev.phrev_8_17
32. Spettel, K., et al. (2019). Analysis of antifungal resistance genes in *Candida albicans* isolates. *PLoS One*, 14(1), e0210397. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210397>
33. Talapko, J., et al. (2021). *Candida albicans*—The Virulence Factors and Clinical Manifestations. *JFungi*, 7(2), 79. <https://doi.org/10.3390/jof7020079>
34. Taylor, M., Brizuela, M., & Raja, A. (2023). Oral Candidiasis. In *StatPearls*. StatPearls Publishing.
35. Telles, D. R., et al. (2017). Oral

- Fungal Infections: Diagnosis and Management. *Dent Clin North Am*, 61(2), 319–349.
<https://doi.org/10.1016/j.cden.2016.12.004>
36. Tobudic, S., et al. (2012). Antifungal susceptibility of *Candida albicans* in biofilms. *Mycoses*, 55(3), 199–204.
<https://doi.org/10.1111/j.1439-0507.2011.02076.x>
37. Tsui, C., et al. (2016). Pathogenesis of *Candida albicans* biofilm. *Pathog Dis*, 74(4), ftw018.
<https://doi.org/10.1093/femspd/ftw018>
38. Vila, T., et al. (2020). Oral Candidiasis: A Disease of Opportunity. *J Fungi*, 6(1), 15.
<https://doi.org/10.3390/jof6010015>
39. Wall, G., et al. (2019). *Candida albicans* biofilm growth and dispersal: contributions to pathogenesis. *Curr Opin Microbiol*, 52, 1–6.
<https://doi.org/10.1016/j.mib.2019.04.001>
40. Shahina, Z., Yennamalli, R. M., & Dahms, T. E. S. (2023). Key essential oil components delocalize *Candida albicans* Kar3p and impact microtubule structure. *Microbiological Research*, 271, 127373.
<https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127373>
41. Shahina, Z., Ndlovu, E., Persaud, O., Sultana, T., & Dahms, T. E. S. (2022). *Candida albicans* reactive oxygen species (ROS)-dependent lethality and ROS-independent hyphal and biofilm inhibition by eugenol and citral. *Microbiology Spectrum*, 10(6), e0318322.
<https://doi.org/10.1128/spectrum.03183-22>

Financiamiento

Proyecto FONDECYT regular 1241130

Agradecimientos

Al laboratorio de Farmacología para el desarrollo de antifúngicos y antineoplásicos. En especial a Perla Tobar, personal técnico del laboratorio.



**Asociación de Universidades
GRUPO MONTEVIDEO**



**UNIVERSIDAD
NACIONAL ✦
DE TUCUMÁN**



