

La teledetección como herramienta para el monitoreo ambiental del manglar en la costa sur de Artemisa y Mayabeque, Cuba

Lisángela Espinosa Amador

E-MAIL: lisangelaespinosaamador2002@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), La Habana, Cuba.

Roxana Aymé Luis Winograd

E-MAIL:

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), La Habana, Cuba.

José Manuel Guzmán Menéndez

E-MAIL:

Agencia de Medio Ambiente (AMA), Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), La Habana, Cuba.

RESUMEN

Los manglares constituyen ecosistemas costeros de vital importancia por sus funciones ecológicas y su papel en la adaptación al cambio climático. Sin embargo, enfrentan crecientes amenazas antrópicas y climáticas que demandan un monitoreo sistemático y preciso. El presente estudio evalúa el uso de la teledetección, específicamente imágenes satelitales Sentinel-2, para el monitoreo de la cobertura vegetal del manglar en la costa sur de las provincias de Artemisa y Mayabeque, Cuba, entre 2017 y 2025. Mediante el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y la aplicación de técnicas de clasificación supervisada con el algoritmo Random Forest, se generaron mapas de cobertura que permitieron cuantificar la dinámica espacio-temporal del ecosistema. Los resultados demostraron la efectividad de la teledetección para detectar cambios en la extensión y salud del manglar, evidenciando su alta resiliencia y recuperación post-perturbaciones. Se concluye que las herramientas satelitales, integradas en un flujo de trabajo de acceso abierto, son fundamentales para el monitoreo ambiental y la gestión adaptativa de estos ecosistemas en el contexto de proyectos de restauración como “Mi Costa”.

PALABRAS CLAVE: Cuba, Manglar, Monitoreo ambiental, NDVI, Random Forest, Sentinel-2, Teledetección

Remote sensing as a tool for environmental monitoring of mangroves on the south coast of Artemisa and Mayabeque, Cuba

ABSTRACT

Mangroves are coastal ecosystems of vital importance due to their ecological functions and their role in climate change adaptation. However, they face increasing anthropogenic and climate threats that demand systematic and precise monitoring. This study evaluates the use of remote sensing, specifically Sentinel-2 satellite imagery, for monitoring mangrove vegetation cover on the south coast of the provinces of Artemisa and Mayabeque, Cuba, between 2017 and 2025. By calculating the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and applying supervised classification techniques with the Random Forest algorithm, land cover maps were generated that allowed quantifying the spatiotemporal dynamics of the ecosystem. The results demonstrated the effectiveness of remote sensing in detecting changes in mangrove extent and health, evidencing their high resilience and post-disturbance recovery. It is concluded that satellite tools, integrated into an open-access workflow, are essential for environmental monitoring and adaptive management of these ecosystems in the context of restoration projects such as “Mi Costa”.

KEYWORDS: Cuba, Environmental monitoring, Mangrove, NDVI, Random Forest, Remote sensing, Sentinel-2

01 INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas de manglar, situados en la interfase tierra-mar, se encuentran entre los más productivos y estratégicos del planeta. Proveen servicios ecosistémicos esenciales como la protección costera contra la erosión y eventos extremos, el hábitat para una vasta biodiversidad, el almacenamiento de carbono (conocido como “carbono azul”) y el mantenimiento de la calidad del agua (Fernández & López, 2019; Zhu et al., 2020). En regiones insulares como Cuba, donde los acuíferos costeros son la principal fuente de agua dulce, los manglares también desempeñan un papel biofísico crucial al interactuar con la hidrología subterránea y actuar como una barrera natural que puede modular la intrusión salina (Espinosa Amador, 2026).

A pesar de su importancia, estos ecosistemas enfrentan crecientes presiones derivadas del cambio climático, como el ascenso del nivel del mar, la intensificación de huracanes y las sequías prolongadas, así como por actividades antrópicas directas (Temmerman et al., 2023). Esta situación exige el desarrollo e implementación de sistemas de monitoreo continuo y espacialmente explícito que permitan evaluar su estado de salud, detectar cambios en su cobertura y comprender su dinámica frente a perturbaciones. El monitoreo tradicional, basado en parcelas de campo, es limitado en extensión y frecuencia, lo que dificulta una visión integral a escala de paisaje.

En este contexto, la teledetección emerge como una herramienta indispensable. La observación de la Tierra mediante sensores satelitales ofrece la capacidad de obtener información sinóptica, periódica y multiespectral de grandes extensiones, permitiendo un monitoreo ambiental efectivo y de bajo costo (Pipia et al., 2021). El presente trabajo enmarcado en el proyecto “Mi Costa” (Tarea Vida), tiene como objetivo demostrar la aplicabilidad de la teledetección con imágenes Sentinel-2 para el monitoreo de la dinámica espacial y temporal de la cobertura del manglar en un sector de la costa sur de Artemisa y Mayabeque, Cuba.

02 REFERENTES TEÓRICOS

El uso de sensores remotos para el estudio de ecosistemas de manglar tiene una trayectoria consolidada a nivel internacional. Diversas investigaciones han empleado imágenes de distintas resoluciones espaciales y espectrales para mapear su extensión, clasificar especies, evaluar su biomasa y detectar cambios en el tiempo (Kuenzer et al., 2011). La disponibilidad gratuita de datos de los satélites de la constelación Sentinel-2 (Agencia Espacial Europea – ESA), con su resolución espacial de 10 m en bandas del visible e infrarrojo cercano y una resolución temporal de cinco días, ha revolucionado el monitoreo de ecosistemas costeros, permitiendo análisis detallados a escalas antes inalcanzables con sensores de mayor resolución espacial pero menor cobertura temporal o con sensores de menor resolución espacial como Landsat (Pipia et al., 2021).

Para el análisis de la vegetación, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es uno de los indicadores más ampliamente utilizados. Su capacidad para cuantificar el vigor y la densidad de la biomasa fotosintéticamente activa, basándose en el contraste entre la reflectancia en el rojo (absorbida por la clorofila) y el infrarrojo cercano (fuertemente reflejada por la estructura foliar), lo convierte en una herramienta fundamental para discriminar áreas de manglar saludable de otras coberturas o de zonas degradadas (World Meteorological Organization (WMO), 2012). En el área de estudio, el NDVI se emplea para diferenciar las densas masas de bosque de mangle de otras formaciones vegetales como el herbazal de ciénaga o el bosque semideciduo.

Junto a los índices espectrales, las técnicas de clasificación digital de imágenes son esenciales para transformar la información espectral en mapas temáticos de cobertura del suelo. Dentro de estas, los algoritmos de aprendizaje automático (machine learning) han demostrado una superior precisión frente a los métodos paramétricos clásicos. El algoritmo Random Forest, desarrollado por Breiman (2001), se ha posicionado como uno de los más robustos y eficaces en teledetección. Al construir un gran número de árboles de decisión a partir de subconjuntos aleatorios de datos y variables, Random Forest reduce el sobreajuste y maneja eficientemente datos multidimensionales, lo que lo hace ideal para clasificar coberturas complejas como los humedales (Breiman, 2001; Espinosa Amador,

2026).

En el contexto cubano, los estudios de vegetación se han apoyado históricamente en el sistema de clasificación fisonómico-florístico-ecológico propuesto por Capote and Berazaín (1984), que establece las bases para identificar las formaciones vegetales del archipiélago. Investigaciones recientes, como la presente tesis, integran este marco conceptual con las tecnologías geoespaciales actuales. Específicamente, el proyecto “Mi Costa” y su antecesor “Manglar Vivo” han creado un escenario propicio para aplicar estas herramientas, con el objetivo de evaluar el éxito de las acciones de restauración y comprender la resiliencia del ecosistema ante eventos climáticos extremos, como los huracanes que periódicamente afectan la región (Espinosa Amador, 2026).

La combinación de imágenes Sentinel-2 de alta resolución, el cálculo de índices espectrales como el NDVI, y la clasificación mediante algoritmos de machine learning como Random Forest, constituye una metodología de vanguardia y de acceso abierto que permite no solo cartografiar el manglar, sino también monitorear su dinámica anual y su respuesta a perturbaciones, proporcionando información crucial para la gestión y la toma de decisiones en materia de conservación y adaptación al cambio climático en zonas costeras.

03 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en la costa sur de las provincias de Artemisa y Mayabeque, Cuba, dentro del Tramo 1 del proyecto “Mi Costa” (Tarea Vida). Comprende los municipios de Alquizar, Güira de Melena (Artemisa), Güines, Melena del Sur y Batabanó (Mayabeque), desde playa Majana hasta playa Rosario. Geográficamente queda delimitada por las coordenadas X_{min} : 311776, Y_{min} : 314523 y X_{max} : 326255, Y_{max} : 401475 (sistema Cuba Norte NAD 27) (Figura 3.1). Esta franja costera se caracteriza por un perfil bajo, pantanoso y la presencia de extensos manglares que forman parte de la Llanura Cársica Meridional (Espinosa Amador, 2026).



Figure 3.1. Ubicación del área de estudio.

3.2. Imágenes satelitales

Se emplearon imágenes del satélite Sentinel-2 (Agencia Espacial Europea – ESA), provenientes de la constelación de dos satélites (Sentinel-2A y Sentinel-2B), que proporcionan una resolución temporal de 5 días y una resolución espacial variable entre 10 y 60 m. Para este estudio se seleccionaron un total de nueve imágenes correspondientes al período 2017–2025, todas adquiridas durante la época seca (noviembre-abril) con el fin de minimizar la influencia de la nubosidad y estandarizar las condiciones fenológicas de la vegetación. El criterio de selección priorizó escenas con un porcentaje de nubosidad inferior al 10% sobre el área de interés.

Las bandas utilizadas fueron:

- Banda 2 (azul, 10 m)

- Banda 3 (verde, 10 m)
- Banda 4 (rojo, 10 m)
- Banda 8 (infrarrojo cercano, 10 m)

Las imágenes fueron descargadas en formato nivel 2A (reflectancia de fondo corregida atmosféricamente) desde el portal Copernicus Open Access Hub, por lo que no requirieron correcciones radiométricas o geométricas adicionales.

3.3. Procesamiento digital

El procesamiento se realizó íntegramente con el software de código abierto QGIS (versión 3.40). Las etapas seguidas fueron:

Cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés).

El NDVI se calculó para cada imagen mediante la expresión:

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4} \quad (3.1)$$

Donde, $B8$ y $B4$ corresponden a las reflectancias en el infrarrojo cercano y el rojo, respectivamente. El NDVI permitió identificar áreas con vegetación activa y discriminar entre coberturas densas y escasas, de acuerdo con la clasificación propuesta por la World Meteorological Organization (WMO) (2012).

3.4. Clasificación supervisada con Random Forest

Se implementó una clasificación supervisada utilizando el algoritmo Random Forest (Breiman, 2001) mediante la herramienta *dzetsaka* disponible en Quantum Geographic Information System (QGIS por sus siglas en inglés). Las firmas espectrales de entrenamiento se obtuvieron a partir de Regiones de Interés (ROIs) definidas por criterio de experto sobre composiciones en color verdadero e infrarrojo, así como con el apoyo del NDVI. Se definieron cuatro clases de cobertura, basadas en la clasificación de formaciones vegetales de Cuba (Capote & Berazaín, 1984):

- Bosque de mangle
- Herbazal de ciénaga
- Bosque semideciduo
- Bosque de ciénaga

Para cada año se generaron entre 50 y 100 píxeles de entrenamiento por clase, distribuidos homogéneamente en el área de estudio. El algoritmo Random Forest se ejecutó con 100 árboles y una profundidad variable, validándose visualmente la consistencia de los resultados.

3.5. Análisis de cambios

A partir de los mapas clasificados se calcularon las superficies (en hectáreas) de cada clase de cobertura para los años 2017 a 2025. Estos valores se tabularon y se analizaron sus tendencias temporales en relación con eventos climáticos extremos registrados (huracanes y sequías intensas).

04 RESULTADOS

4.1. Mapas de cobertura vegetal

La clasificación supervisada permitió obtener mapas anuales de la distribución de las formaciones vegetales en la zona costera (Figuras 4.1, 4.2 y 4.3). Se observa una clara dominancia del herbazal de ciénaga y del bosque de mangle, que juntos constituyen más del 80% de la cobertura vegetal en la mayoría de los años analizados.

Distribución de los tipos de cobertura del humedal en la costa sur de las provincias de Artemisa y Mayabeque para el año 2018

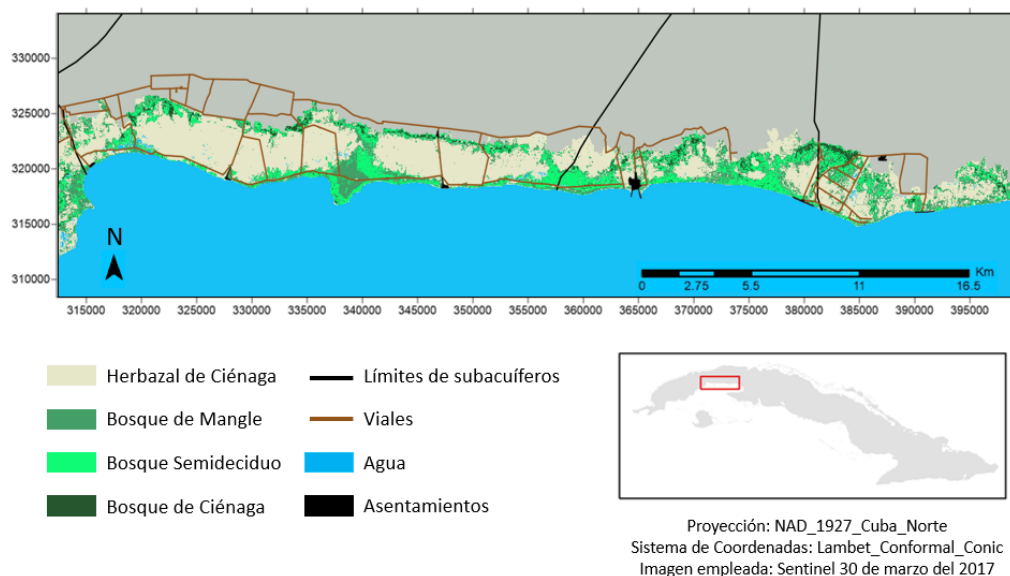


Figure 4.1. Distribución de la cobertura vegetal en el año 2018.

Distribución de los tipos de cobertura del humedal en la costa sur de las provincias de Artemisa y Mayabeque para el año 2024

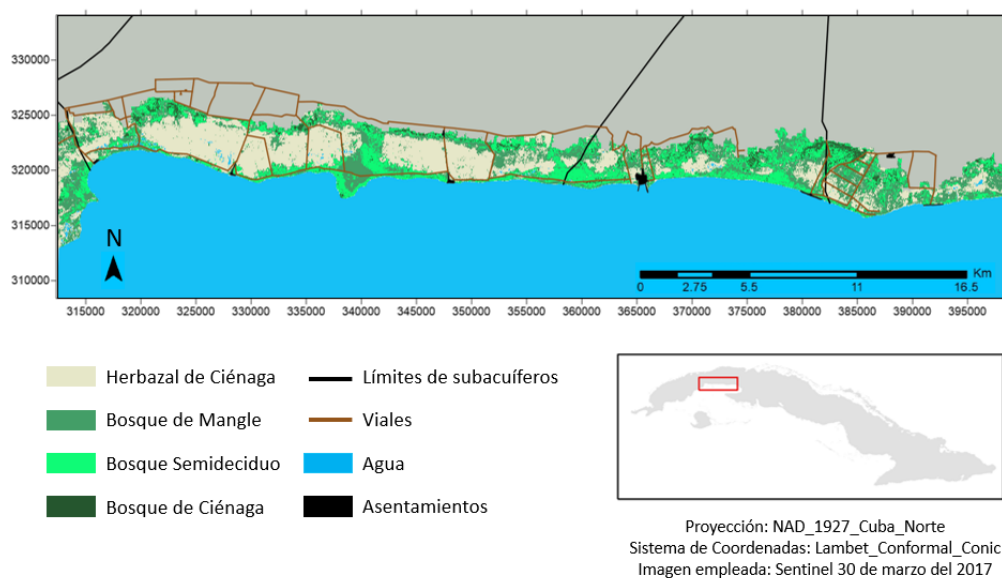


Figure 4.2. Distribución de la cobertura vegetal en el año 2024 (post-huracán Rafael).

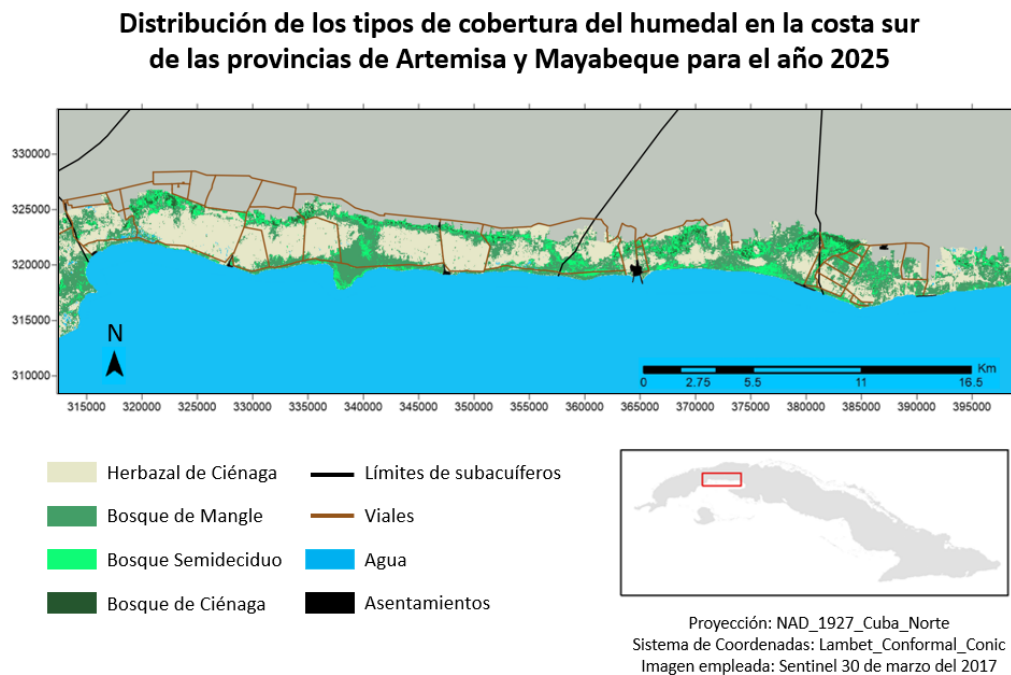


Figure 4.3. Distribución de la cobertura vegetal en el año 2025.

4.2. Evolución de las superficies

La Tabla 4.1 resume las áreas calculadas para cada tipo de cobertura entre 2017 y 2025.

Table 4.1. Áreas de los tipos de cobertura vegetal en la costa sur de Artemisa y Mayabeque (2017–2025)

Año	Área (ha)			
	Bosque de mangle	Herbazal de ciénaga	Bosque semideciduo	Bosque de ciénaga
2017	10 192,69	21 704,32	3 506,66	2 190,37
2018	7 231,66	21 755,99	7 056,34	1 401,44
2019	7 430,87	20 411,45	8 253,57	1 533,02
2020	7 815,40	20 375,27	8 538,49	713,95
2021	11 489,89	18 780,79	2 721,60	791,89
2022	13 249,83	17 867,09	3 086,31	1 030,55
2023	8 620,00	18 235,72	11 115,34	1 165,81
2024	11 622,00	14 989,62	9 538,44	1 811,65
2025	14 814,42	18 235,72	4 920,78	1 165,95

La dinámica temporal muestra fluctuaciones notables. El bosque de mangle experimentó una reducción significativa entre 2017 y 2018, seguida de una recuperación progresiva hasta 2022, un nuevo descenso en 2023 y un repunte histórico en 2025, alcanzando las 14 814,42 ha. Estos cambios están asociados al impacto de fenómenos meteorológicos extremos, como el huracán Rafael (2024) que afectó directamente la costa sur de Artemisa, causando una disminución de la cobertura de manglar en 2023, pero evidenciando una rápida recuperación al año siguiente. El herbazal de ciénaga mantiene una tendencia general a la disminución, mientras que el bosque semideciduo presenta un comportamiento errático, posiblemente influenciado por la dinámica hídrica y la intervención antrópica.

4.3. Resiliencia del manglar

Los resultados confirman la alta resiliencia del ecosistema de manglar. A pesar de las afectaciones por huracanes (como Ian en 2022 y Rafael en 2024) y períodos de sequía intensa (2019-2020), el bosque de mangle ha mostrado capacidad de regeneración natural, alcanzando su máxima extensión en 2025. Este comportamiento sugiere que las medidas de restauración implementadas por los proyectos “Manglar Vivo” y “Mi Costa” pueden estar potenciando la recuperación del ecosistema.

05 CONCLUSIONES

La teledetección, mediante imágenes Sentinel-2 y el índice NDVI, constituye una herramienta eficaz y de bajo costo para el monitoreo ambiental del manglar en la costa sur de Artemisa y Mayabeque. La clasificación supervisada con el algoritmo Random Forest permite obtener mapas temáticos precisos y consistentes a lo largo del tiempo.

Se evidencia una marcada dinámica espacio-temporal de la cobertura de manglar, con fluctuaciones interanuales vinculadas a eventos climáticos extremos (huracanes y sequías). A pesar de estas perturbaciones, el ecosistema demuestra una elevada resiliencia, recuperándose y alcanzando su máxima extensión registrada en 2025.

Los resultados cuantitativos y cartográficos generados brindan una línea base fundamental para la gestión adaptativa del ecosistema y para evaluar el impacto de las acciones de restauración en el marco del proyecto “Mi Costa”.

06 RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar con el monitoreo sistemático utilizando esta metodología, incorporando en el futuro índices espectrales adicionales, por ejemplo, el Índice de Vegetación Mejorado (EVI por sus siglas en inglés) y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI por sus siglas en inglés) y validación de campo para mejorar la precisión de las clasificaciones y comprender mejor los procesos ecológicos subyacentes.

07 REFERENCIAS

- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Capote, R. P., & Berazaín, R. (1984). Clasificación de las formaciones vegetales de cuba. *Revista del Jardín Botánico Nacional*, 5(2), 27–75.
- Espinosa Amador, L. (2026). *Determinación de la relación entre intrusión marina y la respuesta adaptación del manglar* [Tesis de diploma]. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE.
- Fernández, A., & López, T. (2019). Manglares y su función como barrera biofísica ante la intrusión salina. *Revista Cubana de Ingeniería Hidráulica*, 12(3), 45–58.
- Kuenzer, C., Bluemel, A., Gebhardt, S., Quoc, T. V., & Dech, S. (2011). Remote sensing of mangrove ecosystems: A review. *Remote Sensing*, 3(5), 878–928. <https://doi.org/10.3390/rs3050878>
- Pipia, L., Amin, E., & Gómez-Chova, L. (2021). Sentinel-2 data for land cover mapping. *Remote Sensing of Environment*, 252, 112–128.
- Temmerman, S., Horstman, E. M., & Bouma, T. J. (2023). Coastal wetlands and their role in climate adaptation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4, 123–140.
- World Meteorological Organization (WMO). (2012). *Standardized precipitation index user guide* (tech. rep. No. WMO-No. 1090). World Meteorological Organization.
- Zhu, Z., Vuik, V., Visser, P. J., Soens, T., van Wesenbeeck, B., van de Koppel, J., Jonkman, S. N., Temmerman, S., & Bouma, T. J. (2020). Historic storms and the hidden value of coastal wetlands for nature-based flood defence. *Nature Sustainability*, 3(10), 853–862. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0556-z>

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

ORCID de los autores

Lisángela Espinosa Amador <https://orcid.org/0009-0003-9885-6850>
Roxana Aymée Luis Winograd <https://orcid.org/0000-0002-4758-4045>
José Manuel Guzmán Menéndez <https://orcid.org/0000-0002-4989-870X>