

Cartografía climática integrada para la adaptación y conservación del Gran Humedal del Norte de Ciego de Ávila.

Yaneth Coromoto Azuaje de RodríguezE-MAIL:
yaneth.gal1984@gmail.com

Centro de Ingeniería Ambiental y Biodiversidad de Ciego de Ávila (CIBA-CA)

Lázaro Osvaldo Rodríguez Montes de Oca

Centro de Ingeniería Ambiental y Biodiversidad de Ciego de Ávila (CIBA-CA)

Daylon Fundora Caballero

Centro de Ingeniería Ambiental y Biodiversidad de Ciego de Ávila (CIBA-CA)

RESUMEN

El Gran Humedal del Norte de Ciego de Ávila es un ecosistema estratégico por su biodiversidad, regulación hídrica y función como amortiguador ante fenómenos ambientales extremos. Este frágil entorno enfrenta crecientes amenazas debido al cambio climático, incluyendo sequías prolongadas, aumento de temperaturas, intrusión salina en acuíferos y alteración de los patrones de lluvia. Mediante datos georreferenciados, se establecen correlaciones entre fluctuaciones ambientales y la salud del humedal. La cartografía climática es una herramienta indispensable para abordar estos desafíos, permitiendo la visualización espacial y temporal de variables críticas como precipitación, temperatura, humedad, salinidad y dirección del viento. Integra datos satelitales, estaciones meteorológicas y modelos predictivos, contribuyendo a diseñar respuestas adaptativas. Su aplicación prioriza la protección de servicios ecosistémicos y garantiza la sostenibilidad a largo plazo de este patrimonio natural.

PALABRAS CLAVES: Cartografía climática, Adaptación, Humedal, Resiliencia, Cambio climático

Integrated Climate Mapping for the adaptation and conservation of the Gran Humedal Del Norte de Ciego de Ávila

ABSTRACT

The Gran Humedal Del Norte de Ciego de Ávila is a strategic ecosystem due to its biodiversity, water regulation functions, and role as a buffer against extreme environmental events. This fragile environment faces increasing threats from climate change, including prolonged droughts, rising temperatures, saltwater intrusion into aquifers, and altered rainfall patterns. Through georeferenced data, correlations are established between environmental fluctuations and wetland health. Climate mapping is an indispensable tool to address these challenges, enabling the spatiotemporal visualization of critical variables such as precipitation, temperature, humidity, salinity, and wind direction. It integrates satellite data, meteorological stations and predictive models, contributing to design adaptive responses. Its application prioritizes the protection of ecosystem services and ensures the long-term sustainability of this natural heritage

KEYWORDS: Climate mapping, Adaptation, Wetland, Resilience, Climate change

01 INTRODUCCIÓN

El Gran Humedal del Norte de Ciego de Ávila (GHNCA), fue declarado sitio Ramsar de importancia Internacional (Nº1235) el 18 de noviembre del 2002 (Ramsar Convention Secretariat, 2002). Ubicado en la región septentrional de la provincia cubana de Ciego de Ávila, abarca 2,268.75 km². Como humedal costero desempeña funciones ecológicas vitales reconocidas, como la regulación de inundaciones, la recarga de acuíferos, sostiene biodiversidad endémica (incluyendo aves migratorias y manglares), y provisión de recursos pesqueros. Internacionalmente (Ramsar Convention Secretariat, 2010).

Los sistemas de humedales son vulnerables y particularmente susceptibles a cambios en la cantidad y calidad del suministro de agua. Parece que el cambio climático puede tener su efecto más pronunciado en los humedales a través de alteraciones en los regímenes hidrológicos: específicamente, la naturaleza y variabilidad del hidroperíodo y el número y severidad de eventos extremos, sequías, intrusión salina y ascenso del nivel del mar, (Erwin, 2009). Estas amenazas comprometen tanto su integridad ecológica como los medios de vida de comunidades locales dependientes de sus servicios ecosistémico para actividades agrícolas, pesqueras y turísticas.

Ante este escenario, la cartografía climática integrada constituye una herramienta multidisciplinaria fundamental. Combina datos satelitales, estaciones meteorológicas, modelos predictivos y conocimientos tradicionales para generar análisis espaciotemporales de algunas variables clave (precipitación, intrusión salina e intrusión de costa). Su aplicación permite diagnosticar vulnerabilidades y diseñar respuestas adaptativas basadas en evidencia. Además de garantizar la sostenibilidad del patrimonio natural, traduciendo los hallazgos cartográficos en planes de adaptación que aseguren la conservación del humedal y la viabilidad socioeconómica de las poblaciones vinculadas a él.

Los estudios hidroquímicos realizados hasta el momento en el Gran Humedal Norte de Ciego de Ávila relacionan los cambios de salinidad, que se basan en las precipitaciones para la zona, en las temporadas de seca y lluvia, con lo que se demuestra la influencia que tienen las precipitaciones sobre los niveles de salinidad entre bahía interior -zona inundable –acuífero. (Gonzales et al; 2008).

02 MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque metodológico de análisis espacial integrado, combinando la recopilación, procesamiento y modelado de datos climáticos con técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los datos climáticos de precipitación media anual y mensual corresponden a un período de 30 años (1991-2020) y 1961-2020). Estos fueron proporcionados por el Centro de Meteorológico de Provincial (CMP). El conjunto de datos incluyó información de 50 estaciones meteorológicas (figura 1), de ellas 12 pertenecen a la Red Informativa diaria y el resto a la Empresa de Aprovechamiento Hidráulicos de Ciego de Ávila (EAHCA), y garantizan una cobertura adecuada para el análisis espacial del área de estudio. Los mapas de intrusión salina de los suelos e intrusión de la costa en diferentes escenarios (2050; 2100) se realizaron con la información suministrada por el Centro de Meteorológico de Provincial (CMP) de Ciego de Ávila.

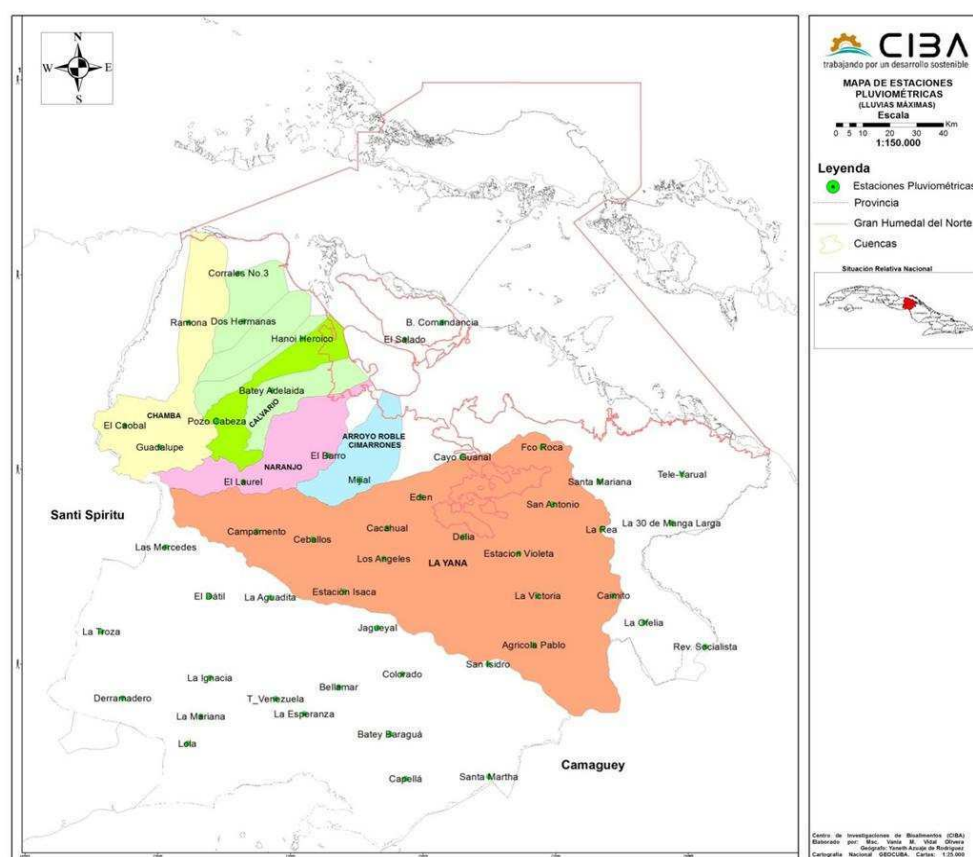


Figura 1. Representación espacial de las estaciones meteorológicas en Ciego de Ávila y el área que ocupan las cuencas del GHNCA.

El procesamiento de los datos y la generación de la cartografía se realizó utilizando el software ArcGIS 10.2 (ESRI, 2013). Para la creación del mapa de isoyetas (líneas de igual precipitación), los datos puntuales de las estaciones meteorológicas fueron interpolados utilizando el método geoestadístico de “Kriging Ordinario”. La elección de esta técnica sobre otros métodos de interpolación deterministas (como el Inverse Distance Weighting - IDW) se basó en sus ventajas fundamentales para el estudio del clima: Optimización y Precisión: estimador óptimo que minimiza la varianza del error de predicción (Best Linear Unbiased Predictor - BLUP), proporcionando la estimación más precisa posible en lugares no muestreados. Manejo de la Autocorrelación Espacial, a diferencia del IDW, que solo considera la distancia, el Kriging utiliza el semivariograma para modelar la estructura de autocorrelación espacial de los datos de precipitación. Esto permite capturar patrones direccionales (anisotropía) y la dependencia espacial entre las estaciones, lo que es crucial para variables climáticas. Finalmente, se ejecutó la interpolación para generar mapas de precipitación con una resolución de celda de 50mm y 100mm a partir del cual se derivaron las curvas de nivel de isoyetas.

03 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La comparación cronológica de los mapas de isoyetas (Figuras 2 y 3) para los períodos 1961-2000 y 2001-2020 respectivamente, revela una alteración climática significativa en la región del Gran Humedal del Norte de Ciego de Ávila (GHNCA). Estos mapas son resultados de las Tablas 1 y 2 que muestran los análisis de precipitación en los mismos períodos de tiempo expuestos. El patrón espacial

histórico, donde las mayores precipitaciones (>1800 mm) se concentraban en las zonas elevadas de las cuencas de los ríos Chambas y Calvario (Figura 2), se ha visto drásticamente modificado.

Tabla 1. Ubicación geográfica de la Red Pluviométrica de Ciego de Ávila y sus valores de precipitación media entre en el período 1961-2000.

Nº	Nombres	Coordenadas X	Coordenadas Y	Altitud	Precipitación (mm)
1	La Troza	701532	224954	50	354,7
2	Ramona	714700	272600	15	242,4
3	Lola	714491	207717	12	434,2
4	La Ignacia	717885	217853	33	378,8
5	La Mariana	716500	211900	22	402,0
6	Corrales No.3	722200	280200	14	212,9
7	Dos Hermanas	722950	272800	19	245,1
8	Batey Adelaida	727208	262127	37	280,0
8	T. Venezuela	727788	214611	24	363,6
10	Hanoi Heroico	731800	270100	10	239,7
11	Ceballos	733340	239179	5	305,4
12	La Esperanza	732100	212300	14	358,1
13	El Barro	735700	252100	40	258,3
14	Estación Isaca	738100	231100	40	300,8
15	Bellamar	737300	216450	17	342,4
16	Mijial	740400	248350	25	267,0
17	Cacahual	744600	240950	25	246,3
18	Los Ángeles	744100	236200	30	247,1
19	Jagueyal	743150	225570	38	344,3
20	Edden	749700	245700	14	233,6
21	Colorado	746897	218409	18	348,6
22	Batey Baraguá	745050	209150	5	378,9
23	San Isidro	759850	219950	45	226,2
24	La Victoria	767350	230500	29	309,5
25	Fco. Roca	767950	253400	10	250,2

Nº	Nombres	Coordenadas X	Coordenadas Y	Altitud	Precipitación (mm)
26	San Antonio	769600	244600	10	245,5
27	Estación Violeta	764452	237000	23	223,0
28	Santa Mariana	776650	248050	12	248,7
29	La Rea	776950	240700	20	266,7
30	Caimito	778717	230512	32	233,7
31	La Ofelia	783300	226350	40	249,5
32	Tele-Yarual	789051	249189	6	214,0
33	La 30 de Manga Larga	787500	241700	20	248,0
34	Rev. Socialista	792550	222650	48	230,1
35	Capellá	747382	202298	3	226,8
36	Agrícola Pablo	766702	222919	35	282,8
37	B. Comandancia	752937	272645	45	425,0
38	El Salado	747253	270001	15	299,2
39	Delia	756150	239600	15	244,8
40	Campamento	724950	240400	110	238,7
41	Cayo Guanál	755914	251869	5	243,2
42	Guadalupe	710337	253400	110	319,8
43	El Caobal	705050	256750	170	234,2
44	Pozo Cabeza	718966	257395	130	253,6
45	La Aguadita	727000	230250	68	259,3
46	El Dátil	717850	230400	80	239,1
47	Las Mercedes	711262	238002	140	364,2
48	Santa Martha	759950	202600	45	355,0
49	El Laurel	722900	248050	110	314,4
50	Derramadero	704739	214722	25	410,6

Fuente: Empresa de Aprovechamiento Hidráulicos de Ciego de Avila (EAHCA).

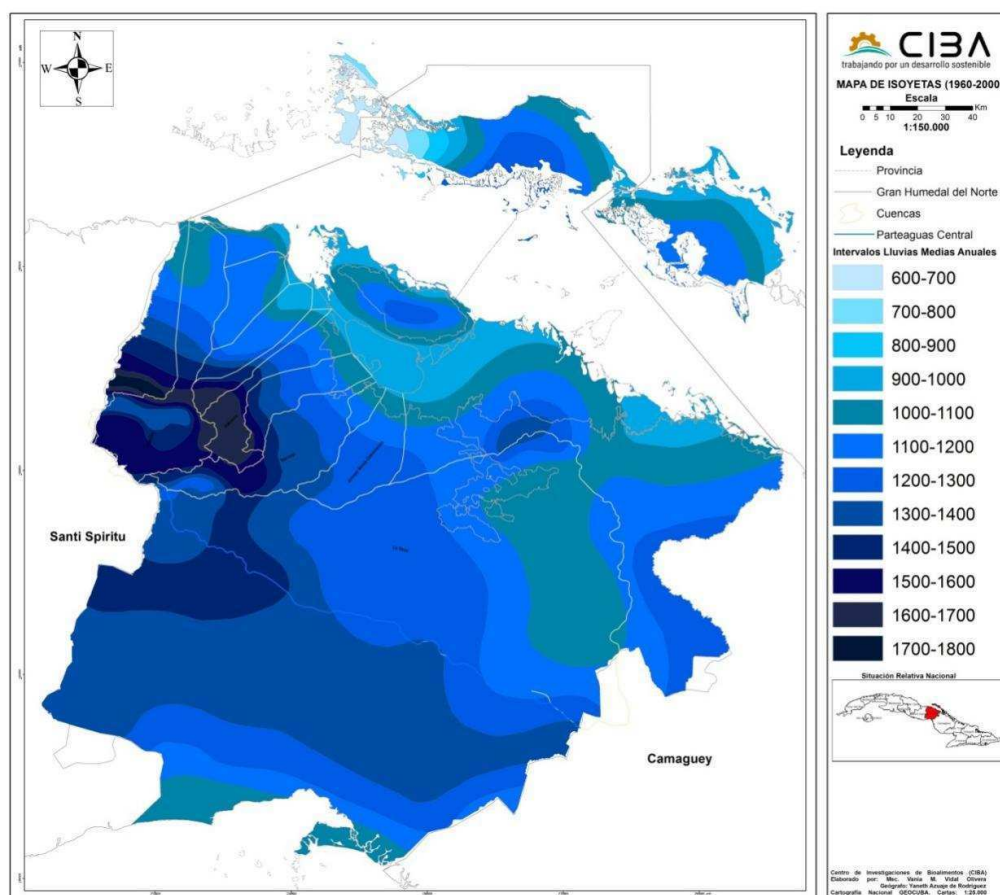


Figura 2. Mapa Isoyético Provincial del comportamiento de las lluvias medias anuales a cada 100mm del período 1961-2000.

El nuevo mapa evidencia una contracción conspicua de las isoyetas hacia el sur, con los máximos acumulados apenas alcanzando los 1500 mm en esas mismas áreas (Figura 3). Este fenómeno no es aislado y concuerda con las proyecciones de cambio climático para la región del Caribe, las cuales anticipan una mayor variabilidad e impredecibilidad en las lluvias, con tendencia a una generalizada reducción de la precipitación media, particularmente en las zonas costeras (IPCC, 2022).

La disminución pluviométrica, especialmente pronunciada en la franja costera norte (ej. estación Tele-Yarual: 214.0 mm), no solo implica un estrés hídrico directo para los ecosistemas del humedal, sino que actúa como un mecanismo amplificador de otras amenazas. La reducción en la recarga de acuíferos disminuye la presión hidrostática del agua dulce subterránea, facilitando la intrusión de la cuña salina, un proceso ya de por sí exacerbado por el ascenso del nivel del mar (Werner & Simmons, 2009).

Tabla 2. Ubicación geográfica de la Red Pluviométrica por los sectores hidrogeológicos del GHNCA y sus valores de precipitación media entre en el período 2001-2020.

Nº de estaciones	Coordenadas X	Coordenadas Y	Precipitación media (mm)
CA-39	714700	272600	1118,2

Nº de estaciones	Coordenadas X	Coordenadas Y	Precipitación media (mm)
CA-42	713100	262300	1542,4
CA-57	722200	280200	1138,1
CA-60	722950	272800	937,1
CA-77	727208	262127	1378,3
CA-80	731800	270100	1235,2
CA-87	733340	239179	1328,3
CA-96	735700	252100	1378,6

Nº de estaciones	Coordenadas X	Coordenadas Y	Precipitación media (mm)
CA-568	766702	222919	1237,3
CA-583	752937	272645	1184,5
CA-584	747253	270001	1153,5
CA-636	756150	239600	1265,1
CA-639	724950	240400	1436,7
CA-644	755914	251869	1166,0
CA-673	710337	253400	1423,5
CA-676	705050	256750	1406,6
CA-679	718		

Nº de estaciones	Coordenadas X	Coordenadas Y	Precipitación media (mm)
CA-874	764212	301596	936,4
CA-882	728400	245700	1305,6
CA-885	740580	308779	808,7
CA-886	712437	259088	1347,7
CA-887	709150	257050	1424,8
CA-888	712500	255850	1437,5
CA-889	784000	239100	1237,9
CA-890	714800	257100	1442,4
CA-892	757250	256700	1151,8
CA-893	721501	232991	1418,1
CA-894	733098	226594	1343,5

Fuente: La Empresa de Aprovechamiento Hidráulicos de Ciego de Avila (EAHCA).

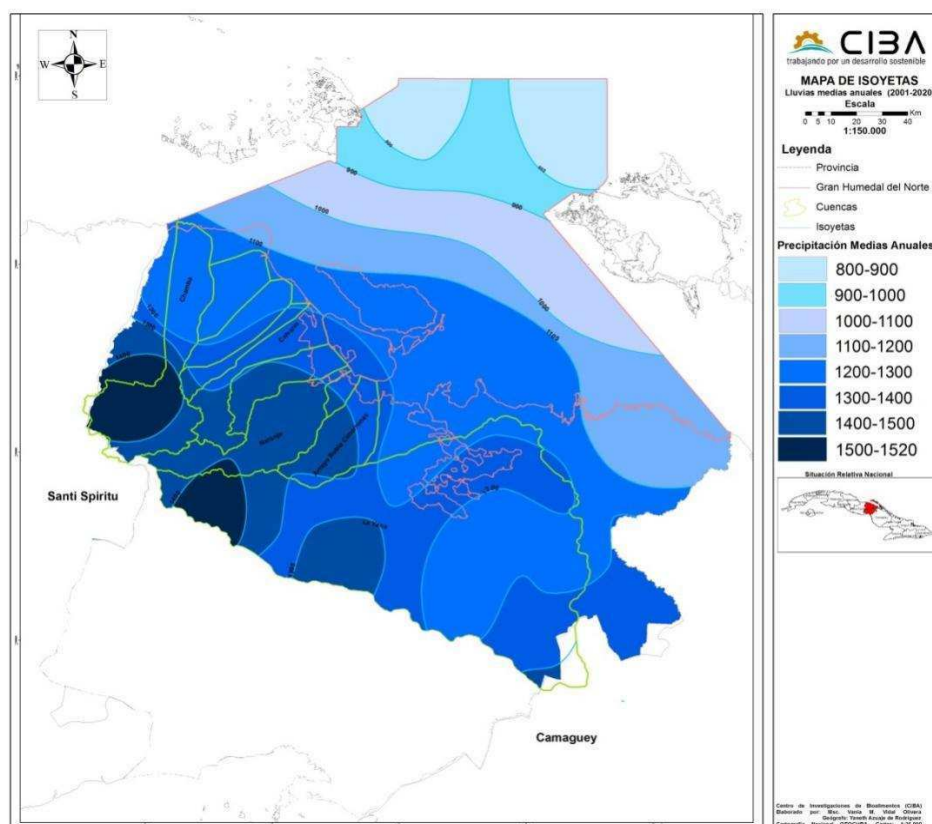


Figura 3. Mapa Isoyético Provincial del comportamiento de las lluvias medias anuales a cada 100mm del período 2001-2020.

INTRUSIÓN SALINA Y SU CONEXIÓN CON EL ASCENSO DEL NIVEL DEL MAR

El mapa de intrusión salina (Figura 4) y las proyecciones de ascenso del Nivel Medio del Mar (NMM) para 2050 (27 cm) y 2100 (85 cm) (Figura 5) deben interpretarse de forma sinérgica, ya que representan una amenaza combinada y catastrófica para la seguridad hídrica de la región.

El ascenso del NMM ejerce presión hidrostática sobre los acuíferos costeros, impulsando el avance tierra adentro del agua salada (Ferguson & Gleeson, 2012). Este proceso, conocido como intrusión salina, se ve potenciado de manera crítica por la disminución de la recarga de agua dulce proveniente de la precipitación, tal como se ha documentado en el análisis de isoyetas. El resultado es una degradación acelerada de los acuíferos, que son la principal fuente de agua para las comunidades locales (ej. municipios de Morón, Chambas, Bolivia), así como para la agricultura (Figura 5).

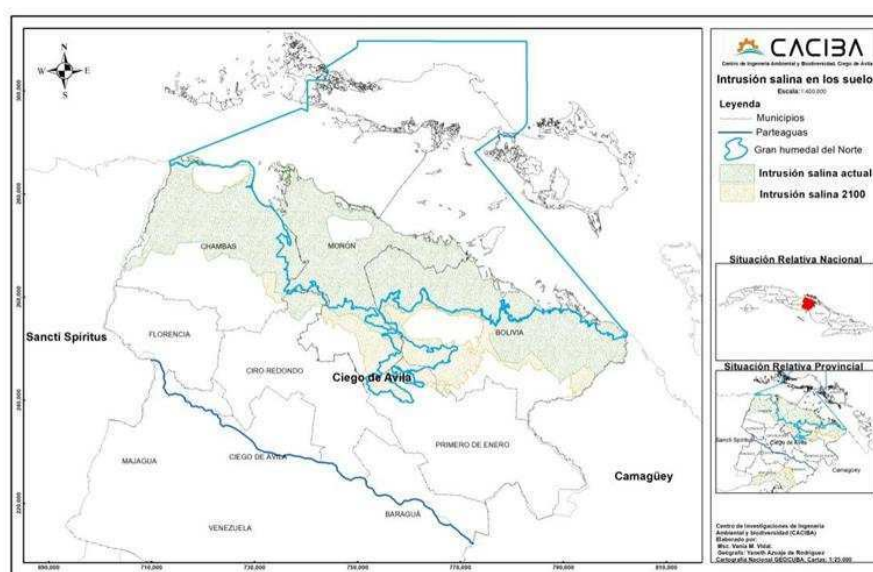


Figura 4. Mapa de intrusión salina actual y para el 2100 en los suelos del GHNCA.

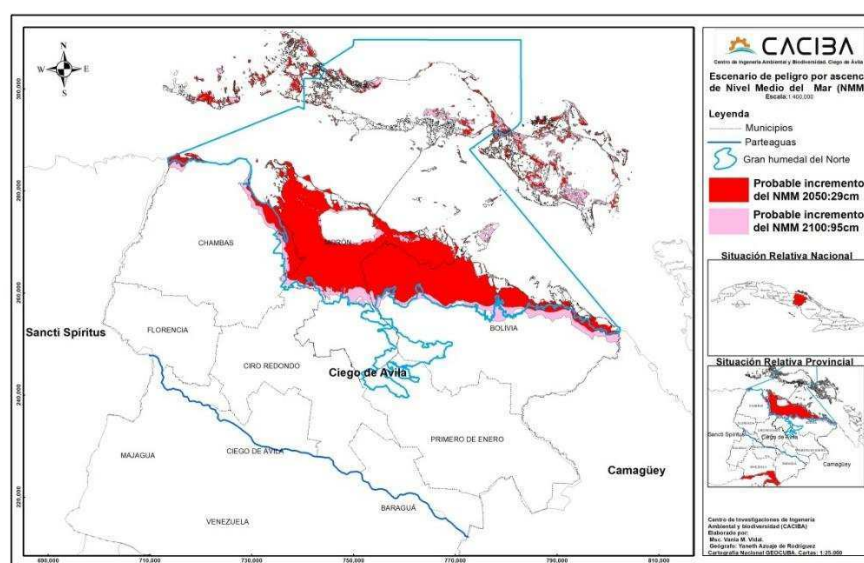


Figura 5. Mapa de peligro por ascenso del Nivel Medio del Mar para el GHNCA en escenarios 2050 y 2100.

Este escenario de "doble presión" (menos lluvia + mar más alto) ha sido observado en otros humedales costeros a nivel global. Por ejemplo, estudios en el Delta del Mekong en Vietnam (Erwin, 2009; Tran et al., 2021) y en los Everglades de Florida, EE.UU. (Pearlstone et al., 2010) demuestran cómo la interacción entre la extracción de agua subterránea, la reducción del flujo de agua dulce continental y el ascenso del nivel del mar conduce a una salinización rápida y extensa de suelos y acuíferos, comprometiendo la viabilidad de los ecosistemas y las economías locales.

INTRUSIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA Y PÉRDIDA DE ECOSISTEMAS

El mapa de intrusión de la línea de costa (Figura 6) proyecta la pérdida física de territorio debido a la erosión costera acelerada por el ascenso del NMM y el posible aumento en la frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos extremos. El retroceso de línea de costa no es solo un problema de espacio, sino de pérdida de servicios ecosistémicos críticos en áreas de extrema vulnerabilidad y especificidad.

Los ecosistemas costeros como los manglares y las praderas de pastos marinos, que caracterizan al GHNCA, son la primera línea de defensa contra la erosión y las inundaciones. Su inundación permanente o retroceso implica entre otras amenazas, pérdida de biodiversidad, reducción de la resiliencia costera y liberación de carbono.

El primer caso implica destrucción de hábitats de cría para peces, refugio para aves migratorias y residentes, y de una biodiversidad única adaptada a condiciones específicas de salinidad. En el caso de la reducción de la resiliencia costera, no existiría la barrera física y de amortiguamiento que proveen los manglares, por lo que el interior del humedal y las comunidades costeras se volverían más vulnerables a la energía del oleaje y a las marejadas asociadas a huracanes (McIvor et al., 2012). Por último, la consecuente liberación de carbono se explica debido a que los suelos de estos ecosistemas, especialmente las turberas en manglares, son sumideros de carbono altamente eficientes. Su inundación y degradación pueden conducir al incremento de la emisión de gases de efecto invernadero, creando un bucle de retroalimentación positiva con el cambio climático (Lovelock et al., 2017).

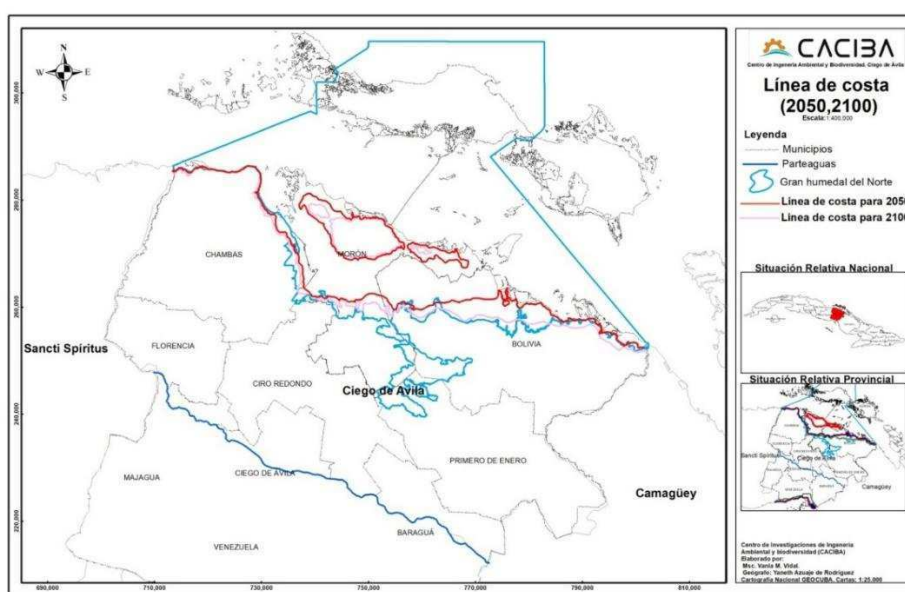


Fig. 6. Mapa de retroceso de línea de costa en el GHNCA para los escenarios 2050 y 2100

La situación documentada para el GHNCA es similar a la que ocurre en otros grandes deltas y humedales costeros del mundo, como el Sundarbans en India/Bangladesh (Rahman et al., 2011) y el ya mencionado Delta del Mekong, donde la combinación de subsidencia, ascenso del nivel del mar y alteraciones hidrológicas aguas arriba, está provocando una pérdida masiva de territorio y la salinización de vastas áreas productivas.

04 CONCLUSIONES

- La reducción de las precipitaciones, el ascenso del nivel del mar, la intrusión salina y la erosión costera son fenómenos que actúan en sinergia, acelerando la degradación de los ecosistemas.
- La cartografía climática no es solo una herramienta de diagnóstico, sino que representa la base fundamental para la planificación de la adaptación. La identificación espacialmente explícita de las zonas de máxima vulnerabilidad (áreas costeras bajas y acuíferos del norte) permite priorizar acciones de manera más efectiva.
- Las estrategias de adaptación deben ser multisectoriales e incluir, entre otras, la rehabilitación de manglares para la protección costera y el secuestro de carbono; la implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real de la salinidad en acuíferos; el desarrollo de agricultura resiliente a la salinidad; y la planificación de reubicación estratégica de comunidades e infraestructuras críticas en las zonas de mayor riesgo de inundación permanente.
- La replicabilidad de esta metodología de análisis integrado la convierte en un modelo para la conservación de humedales tropicales costeros en toda la región del Caribe, que enfrentan presiones climáticas similares.

05 RECONOCIMIENTO

Se le agradece al Centro de Ingeniería Ambiental y Biodiversidad Ciego de Avila (CIBA_CA) por permitirme realizar la investigación.

Agradecimientos a la Mcs. Vania M, Vidal Olivera por ser la persona que apoyo esta investigación, y quien estuvo en todo momento.

05 REFERENCIAS

- Erwin, K. L.** (2009). "Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world". *Wetlands Ecology and Management*, 17(1), 71-84. <https://doi.org/10.1007/s11273-008-9119-1>
- Ferguson, G., Gleeson, T.** (2012). "Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change". *Nature Climate Change*, 2(5), 342–345. <https://doi.org/10.1038/nclimate1413>
- González, J., Menéndez, H; González, R., Fonseca, J., González, R; Vidal, Vania.** (2008). "Papel regulador de las zonas inundables del humedal en el intercambio salino subterráneo entre las bahías interiores-acuíferos en el Gran Humedal del Norte de Ciego de Ávila". Núm. 2, abril-junio, 2008, pp. 66-74. Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago de Cuba Santiago de Cuba, Cuba.

- IPCC** (2022). "Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change". Cambridge University Press.
- Lovelock, C. E., Cahoon, D. R., Friess, D. A., Guntenspergen, G. R., Krauss, K. W., Reef, R., Saintilan, N.** (2017). "The vulnerability of Indo-Pacific mangrove forests to sea-level rise". *Nature*, 526 (7574), 559-563. <https://doi.org/10.1038/nature15538>
- McIvor, A. L., Möller, I., Spencer, T., Spalding, M.** (2012). "Reduction of wind and swell waves by mangroves". *Nature Communications*, 3 (1), 1-6. <https://doi.org/10.1038/ncomms2340>
- Pearlstine, L. G., Mazzotti, F. J., & Brandt, L. A.** (2010). "Implications of climate change and sea level rise for Everglades restoration". *Journal of Coastal Research*, 26 (5), 814-825. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-09-00008.1>
- Rahman, M. M., Rahman, S., Islam, K. S.** (2011). "The response of mangrove forest to the climate change: A review". *Indian Journal of Science and Technology*, 4(11), 1492-1496.
- Ramsar** (2007). "El manejo de las aguas subterráneas: Lineamientos para el manejo de las aguas subterráneas a fin de mantener las características ecológicas de los humedales". *Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales*, 3ª edición, vol. 9. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza).
- Tran, D. A., Tsujimura, M., Pham, H. V., Nguyen, T. M. H., & Le, T. S.** (2021). "Understanding the role of groundwater in a changing climate: A case study in the Mekong Delta, Vietnam". *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 36, 100858. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100858>
- Vidal V. M., González-Abreu R., Jiménez Y., Valdés A. L., Castro M., y Rodríguez D.,** (2015). "Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero norte de la provincia Ciego de Ávila". *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. Vol. XXXVI, N° 2, pp 45-56. CIH. ISJAE. La Habana, Cuba.
- Werner, A. D., Simmons, C. T.** (2009). "Impact of sea-level rise on sea water intrusion in coastal aquifers". *Groundwater*, 47 (2), 197-204. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2008.00535.x>

Conflicto de intereses

El autor declara que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Yaneth Coromoto Azuaje de Rodríguez <https://orcid.org/0009-0007-2040-6891>

Realizó la mayor parte de la interpretación de los datos. Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados, mapificación y redacción del informe final.

Lázaro O. Rodríguez Montes de Oca <https://orcid.org/0009-0007-8456-627>

Contribuyó al análisis estadístico e interpretación de los datos. Participó en la búsqueda de información y en la redacción del informe final.

[Daylon Fundora Caballero](https://orcid.org/0000-0003-0386-3453) <https://orcid.org/0000-0003-0386-3453>

Participó en la búsqueda de información. Trabajó en la revisión de la redacción y en la organización de los datos. Participó en la redacción del informe final.