



ATLAS

DE ÁREAS DE INTERÉS PARA
LA EXPLORACIÓN DE H2 EN
EL NORTE DE COLOMBIA

ATLAS

DE ÁREAS DE INTERÉS PARA LA EXPLORACIÓN DE H2 EN EL NORTE DE COLOMBIA

ANH Agencia Nacional de Hidrocarburos

Orlando Velandia Sepúlveda
Presidente

María Cecilia Ruiz Cardona
Vicepresidenta Técnica

Carlos Ernesto García Ruiz
Experto - Vicepresidencia Técnica

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) Facultad Seccional Sogamoso

Héctor Antonio Fonseca
Decano

Supervisores del Proyecto:

Oscar García Cabrejo

Luis David Mesa

Director Subproyecto 2:

Mario Andrés Cuellar Cárdenas

Equipo de trabajo:

Claudia Lorena Fuentes Guevara, Cristian David Valderrama Rodríguez, Diego Armando Penagos López, Johan Santiago Torres Corredor, Liliana Plazas Zea, Luis David Mesa Ríos, Manuel Guillermo Zafra Dulcey, Michael Alejandro Pérez Moreno, Nelson René López Patiño, Ronald Ricardo Cárdenas Reyes, Sergio Andrés García Arias.

Fotografías cortesía de:

Jaír Ramírez Cadena

Dirección de arte y diseño:

Ana Berrio

Diseñadores:

Yury Alejandra Cuaran Bedoya
Sergio Adrián López Isaza

Corrección de estilo:

Alexandra Cano

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

La ANH y la UPTC han celebrado el contrato Interadministrativo 419 de 2024, el cual dentro de sus diversos objetivos, tiene la finalidad de desarrollar el proyecto denominado Subproyecto 2 cuyo propósito es la "Adquisición, procesamiento e interpretación de datos de sensores remotos en zonas de interés para proyectos de exploración de Hidrógeno Natural (H₂). Cartografía litológica y de alteraciones minerales, cartografía geobotánica e inventario y análisis de estructuras de tipo Fairy Circles en el norte de Colombia"; en el marco de este subproyecto 2, se ha elaborado el "Atlas de áreas de interés para la exploración de H₂ en el norte de Colombia" como instrumento de divulgación de este subproyecto.

El Subproyecto 2 se encuentra en el noreste de la península de La Guajira, Colombia, abarcando gran parte del municipio de Uribia. Esta región, conocida como la Alta Guajira, está habitada principalmente por la comunidad Wayúu, en el Resguardo Indígena de la Alta y Media Guajira. El clima es árido, con precipitaciones anuales inferiores a 300 mm, que ocurren entre septiembre y noviembre, las temperaturas anuales varían entre los 25°C y 36°C. La información hidrometeorológica entre 2010 y 2024 destaca la influencia de los fenómenos de El Niño y La Niña, relacionados con aumentos en las precipitaciones y temperaturas respectivamente, destacando los meses de junio a agosto como los más calurosos.

La geomorfología de los círculos de hadas en el área de estudio se analizó utilizando ArcMap, mediante un análisis estadístico para determinar la cantidad de estos círculos en cada unidad geomorfológica. Se generó una distribución porcentual que facilita la comprensión de la relación entre estos fenómenos y características del terreno como pendiente, curvatura y rugosidad, analizadas mediante Modelos Digitales de Elevación (DEM).

Para el cálculo de variables temáticas y la generación de mapas temáticos, se implementó un flujo de procesamiento y análisis de imágenes multiespectrales, hiperespectrales y térmicas para cada uno de los satélites. Este proceso incluyó una revisión bibliográfica de metodologías relacionadas con el contexto geológico, índices espectrales, combinaciones de bandas, reducción de dimensionalidad y algoritmos de clasificación supervisada y no supervisada, apoyados en herramientas de aprendizaje automático y bibliotecas de firmas espectrales.

Se realizó un análisis multitemporal con los satélites ASTER, Sentinel-2, Landsat 8 y Landsat 9. En el caso del satélite ASTER, se delimitaron áreas y se evaluó el estado fenológico de la vegetación mediante índices de vegetación en eventos climáticos como El Niño y La Niña. Con las imágenes del satélite Sentinel-2, se calcularon índices de vegetación y minerales desde 2016 hasta 2024. Las imágenes de Landsat 8 permitieron un estudio temporal desde el año 2013 al 2024, con el cálculo de la correlación de Pearson entre índices vegetales y minerales, se identifica correlación relaciones positivas entre NDVI, SAVI y EVI, todos ellos índices que se asocian con la vegetación. Se evidencia una correlación negativa de estos índices de vegetación con el NDWI. Para Landsat 9, se calcularon índices de vegetación, obteniendo resultados para el periodo 2021-2023.

Finalmente, se desarrolló una metodología geobotánica que incluye la selección de áreas, correcciones geométricas y radiométricas, el cálculo de índices y el uso de algoritmos SAM y MTMF para identificar emisiones de hidrógeno. Esta metodología integra datos espectrales con información geológica, topográfica y geoquímica, creando un modelo predictivo característico del área de estudio en La Guajira. Se utilizó la temperatura superficial (LST) para analizar variaciones vegetales y detectar posibles anomalías asociadas con estrés vegetal o cambios taxonómicos.

El cálculo de la LST y otras variables temáticas, mediante imágenes satelitales, implicó varias etapas, desde la descarga y preprocesamiento de imágenes hasta la obtención de datos radiométricos y su conversión. Para cada variable de interés se desarrollaron metodologías específicas, incorporando aprendizaje automático y técnicas de postprocesamiento para mejorar la interpretación de resultados. Todos los resultados obtenidos, así como los cubos espaciotemporales generados, se incluyeron en un repositorio, facilitando el acceso y manejo de la información.

Los resultados de los índices espectrales asociados a la vegetación destacan las áreas con diferentes grados de cobertura vegetal, mientras que el índice mineral de hierro permite demarcar y correlacionar las unidades geológicas de interés, especialmente aquellas correspondientes a formaciones metamórficas. A escala regional, los resultados también evidencian la delimitación de estructuras geológicas asociadas a fallas,

Con base en los resultados de los índices espectrales y minerales, se seleccionaron tres áreas de interés, cada una de aproximadamente 100 kilómetros cuadrados, sumando un total de 300 kilómetros cuadrados para la propuesta de levantamiento hiperespectral. Estas áreas fueron elegidas debido a sus características geobotánicas y geológicas, así como por su potencial para identificar las fuentes u orígenes del hidrógeno en la región.

Las representación cartográfica de este Atlas, tanto vectorial como raster, utiliza como sistemas de referencia, coordenadas geográficas datum Magna-Sirgas al igual que coordenadas planas, datum Magna-Sirgas Origen Nacional



Fotografía: Manuel Zafra.

CAPÍTULO 1

El papel del hidrógeno en la transición energética

La exploración y producción del hidrógeno natural (o blanco), surge del creciente interés en fuentes de energía limpias y libres de carbono. Este hidrógeno se encuentra principalmente en áreas donde las fuerzas tectónicas han promovido el levantamiento de la corteza oceánica en las márgenes continentales, destacándose como fuente en formaciones de ofiolitas (Zgennik, 2020). Los acumulados de hidrógeno natural se localizan en diversos entornos geológicos, lo que sugiere múltiples mecanismos para su generación (Bendall, 2022).

El hidrógeno puede encontrarse como gas libre o incluido dentro de muestras de roca, atrapado en poros o en estado adsorbido (Zgennik, 2020; Aimikhe & Eyankware, 2023). Como gas libre, suele asociarse a regiones donde la corteza oceánica ha emergido a la superficie, como en las ofiolitas, cuya naturaleza prolífica para la producción de hidrógeno ha generado gran interés. Los estudios indican que el proceso dominante de producción es la serpentinización. Además, otras formaciones geológicas como zonas de rift, dorsales oceánicas, rocas ígneas, cuencas carboníferas, sistemas hidrotermales y géiseres también han sido identificadas como depósitos de hidrógeno (Donzé et al., 2020; Zgennik, 2019).

En términos generales, las rocas generadoras de hidrógeno se clasifican en cuatro categorías: rocas oceánicas y mantélicas (H2-GR1), sedimentos ricos en hierro y rocas intrusivas (H2-GR2), rocas radiactivas (H2-GR3) y rocas fuente ricas en material orgánico, especialmente carbón (H2-GR4). En los primeros tres casos, el hidrógeno proviene del agua mediante reacciones redox o radiolisis, mientras que en la última categoría se origina a partir de materia orgánica (Vacquand et al., 2018; Lévy et al., 2023; Carrillo et al., 2023).

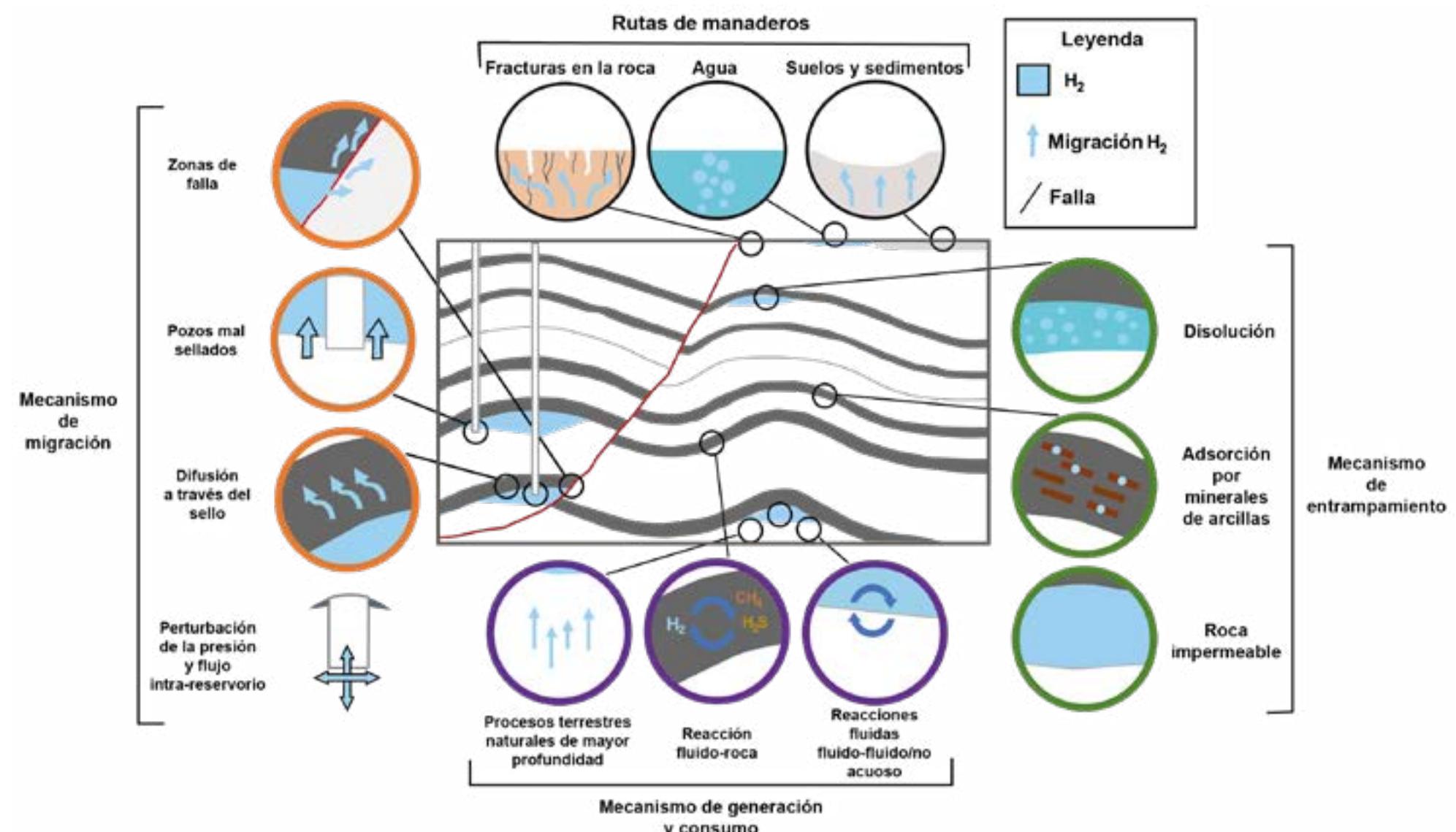


Figura 1.1 Mecanismos potenciales para la generación y consumo de hidrógeno (círculos morados), atrapamiento (círculos verdes) y migración (círculos naranjas) en el subsuelo y su expresión en afloramientos en la superficie (círculos negros). Modificado de McMahon et al. (2023), basado de Heinemann et al. (2021).

Ejemplos continentales incluyen formaciones como Monte Chimaera (Turquía), Los Fuegos Eternos (Filipinas), la ofiolita de Semail (Omán) y otros sitios en Grecia, Portugal, Nueva Caledonia y Bosnia-Herzegovina. Estas regiones están relacionadas con la producción de hidrógeno por serpentización de complejos ultramáficos u ofiolíticos (Gaucher, 2020; Zgennik, 2020). Además, en ambientes intracratónicos, como la Cuenca de Sao Francisco (Brasil) y Bourakebougou (Malí), el hidrógeno se origina de interacciones químicas entre fluidos y rocas, como la oxidación de minerales ricos en Fe^{2+} o la radiolisis del agua (Guéland et al., 2017; Prinzhofer et al., 2018).

El hidrógeno natural también puede manifestarse como rasgos superficiales subcirculares, denominados "círculos de hadas" por algunos autores (Prinzhofer et al., 2019; Moretti et al., 2021a). Estos patrones son visibles mediante imágenes satelitales y suelen asociarse con procesos como la oxidación y reducción de hierro en minerales ferrosos, por ejemplo, durante la serpentización de la litosfera oceánica o la alteración de formaciones de hierro bandeado (BIF) (Borehan et al., 2021; Aimar et al., 2023).

El hidrógeno es el elemento más abundante del universo, pero su concentración en la atmósfera terrestre es de apenas 0.5 ppm como H_2 , menor que la de CO_2 y CH_4 . Esta baja concentración facilita la detección de filtraciones que excedan este valor (Moretti et al., 2022; McMahon et al., 2023). En Colombia, debido a la acreción de terrenos oceánicos por subducción en la costa del Pacífico, se encuentran al menos tres tipos de rocas generadoras de H_2 : ofiolitas, carbón y facies ricas en hierro (Carrillo et al., 2023).



Fotografía: Manuel Zafra.



Fotografía: Jaír Ramírez Cadena

CAPÍTULO 2

La Alta Guajira: Potencial de hidrógeno natural

El hidrógeno es clave en la transición hacia energías limpias. Como vector energético, almacena y transporta energía eficientemente. La transición energética ha sido relevante para mitigar efectos negativos frente a el cambio climático; actualmente la Alta Guajira en Colombia representa una región estratégica por su potencial para la exploración y explotación de hidrógeno natural.

Mediante una metodología integrada que combina análisis y comprensión del contexto geológico, mapas de anomalías geofísicas, variables temáticas calculadas con imágenes de sensores remotos y modelos de machine learning, se han priorizado siete polígonos que reflejan la variabilidad y potencial de estas zonas.

Estos polígonos fueron analizados mediante adquisición de información hiperespectral aerotransportada. Entre las variables identificadas como relevantes para la exploración de hidrógeno natural en la Alta Guajira, se consideran patrones de fallamiento y fracturamiento, presencia de posibles procesos de serpentización, identificación de mecanismos de migración y almacenamiento del recurso.

La transición hacia el hidrógeno representa un paso hacia fuentes de energía más sostenibles y menos contaminantes. El coste asociado a la explotación de 1 kg de hidrógeno natural puede estimarse entre 2 y 10 veces menor que el coste del hidrógeno manufacturado. (Prinzhofner, et al., 2019), esto asociado a la energía eléctrica que es necesaria para separar el hidrógeno de otros elementos, traduciéndose en baja eficiencia del uso de la energía disponible (Patiño et al. 2023).

Marco geológico y estructural de La Guajira

Los patrones de fallamiento y la estructura tectónica de la región reflejan una compleja interacción de fuerzas compresivas y extensivas, acompañada por la reactivación de fallas durante procesos de inversión tectónica. Estas estructuras son clave en la generación, migración y almacenamiento de hidrógeno, mediante mecanismos como la percolación de aguas meteóricas

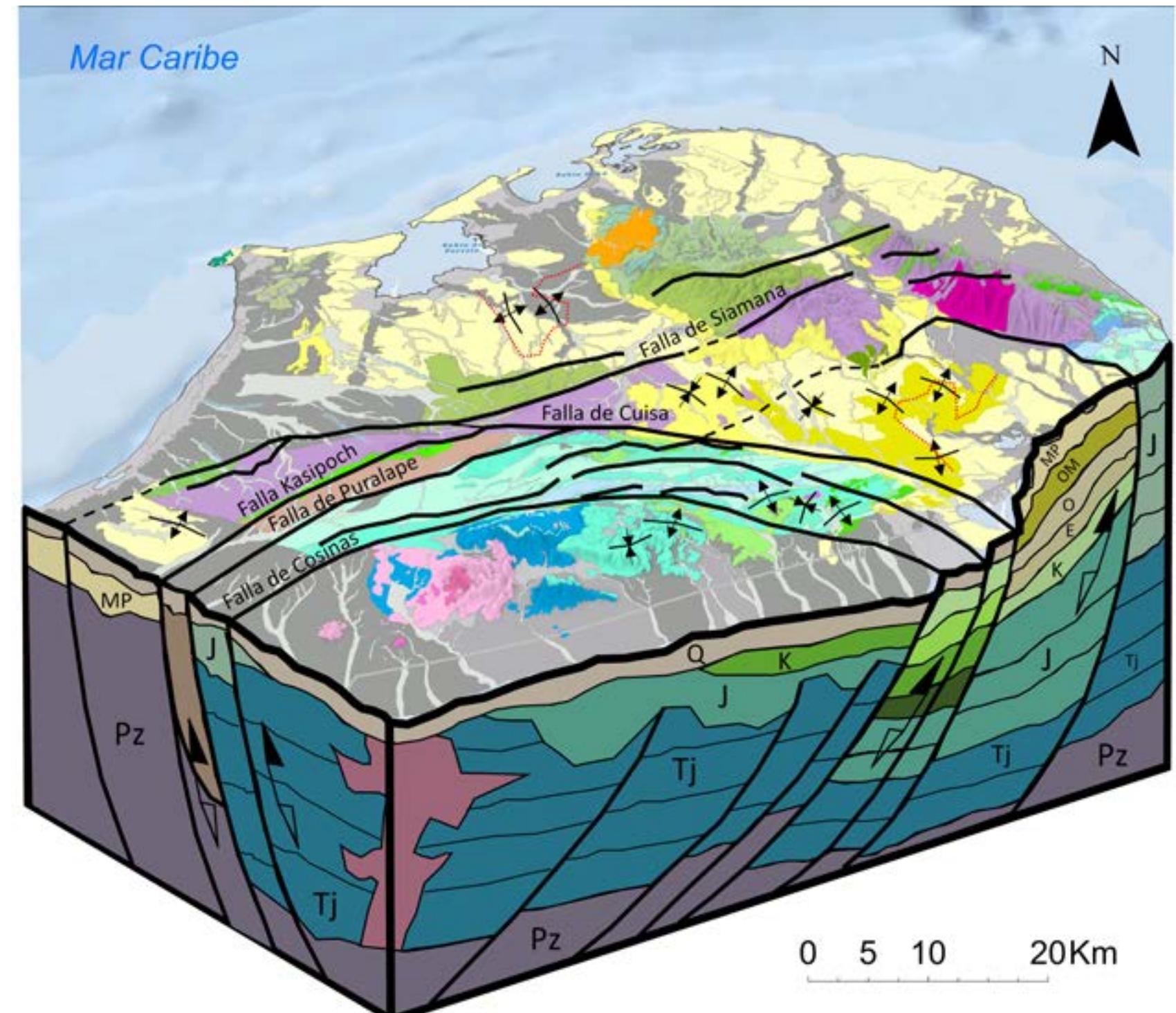


Figura 2.1 Modelo geológico de inversión tectónica propuesto para la región de La Guajira en el norte de Colombia.

y la serpentización del basamento. Las características de las formaciones geológicas, como las areniscas cenozoicas y los sellos regionales, desempeñan un papel crucial en la formación de reservorios de hidrocarburos y en la identificación de oportunidades de exploración estratigráfica.

En la zona de estudio, se identifican geometrías de inversión tectónica relacionadas con el desplazamiento de depocentros hacia el suroriente de la Falla Cuisa. Estas incluyen retrocabalgamientos, cabalgamientos, plegamientos en el bloque superior de la falla invertida y estructuras tipo pop-up en áreas adyacentes. La expulsión de material por cabalgamientos hacia el exterior del graben, debido a problemas volumétricos,

puede incorporar bloques de basamento de diferentes edades y unidades de cuenca formadas en ambientes profundos. Esto genera estilos estructurales complejos, con fallas interconectadas y la inversión de semigrabenos, resaltando la dinámica tectónica de la región.

Sub-zonas priorizadas para el levantamiento hiperrespectual

Un total de siete polígonos fueron seleccionados para el levantamiento hiperespectral. Las áreas de estos polígonos

acumulan una extensión total de 350 km², que se distribuye de la siguiente manera:

- Polígono 1: 30 km²
 - Polígono 2: 40 km²
 - Polígono 3: 40 km²
 - Polígono 4: 60 km²
 - Polígono 5: 100 km²
 - Polígono 6: 40 km²
 - Polígono 7: 40 km²

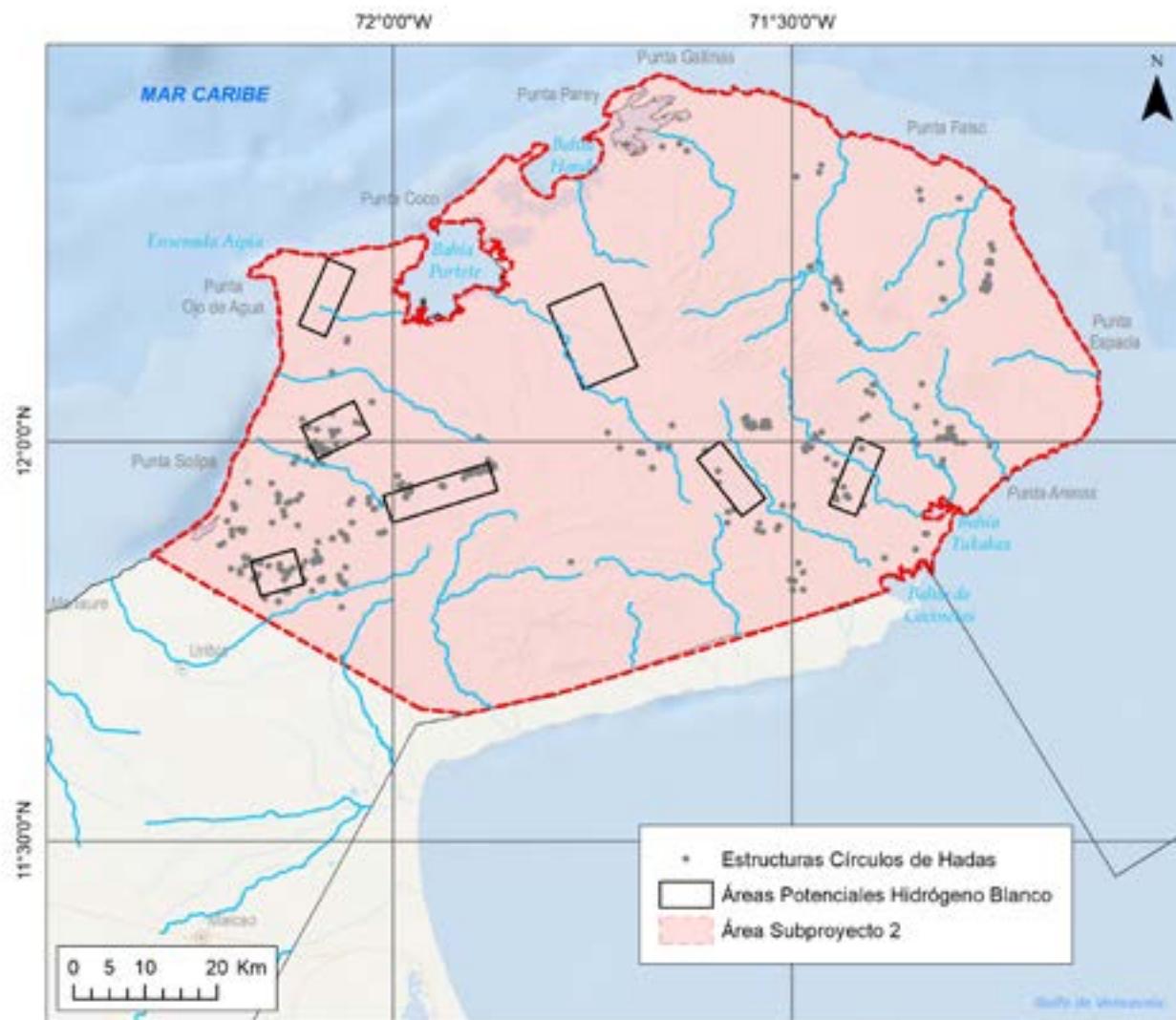


Figura 2.2. Áreas priorizadas para estudio detallado y distribución de los círculos de hadas identificados.

Variable de interés	Polígono						
	1	2	3	4	5	6	7
Rocas de interés	No	No	Si	Si	No	No	No
Morfometría	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Anomalía magnética	Si	Si	Si	Si	No	No	No
Anomalía gravimétrica	Si	Si	Si	Si	No	No	No
Geobotánica	Si	Si	Si	Si	No	Si	No
LST	No	No	No	Si	Si	Si	No
Alteraciones minerales	Si	No	No	Si	No	Si	No
Fracturamiento	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Machine Learning	Si	Si	No	Si	Si	Si	No

Tabla 2.1 Síntesis y evaluación de las variables de interés para cada polígono, la evaluación considera si la variable es relevante en la justificación del área.



Fotografía: Jaír Ramírez Cadena

CAPÍTULO 3

Influencia del factor climático local

El Subproyecto 2 se desarrolla en el municipio de Uribia, en el departamento de La Guajira, la región más septentrional de Colombia y América del Sur. Con un área total de 7015,8 km², el municipio está mayoritariamente habitado por la comunidad Wayúu, propietaria colectiva del gran Resguardo Indígena de la Alta y Media Guajira. Este resguardo cubre toda la zona rural, mientras que la cabecera urbana de Uribia, situada en la Media Guajira, no forma parte del resguardo y abarca un área de 2,5 km de radio.

La Alta Guajira presenta una geografía y condiciones climáticas que destacan por su diversidad y carácter extremo. Su orografía está dominada por un paisaje desértico y semiárido, con sistemas montañosos como la Sierra de la Macuira, La Jarra y Parashi, además de rasgos como la Depresión de Cosinas y el Sistema Carpintero, que enriquecen su topografía. El clima es árido, con temperaturas que oscilan entre 25°C y 40°C, lluvias escasas (menos de 300 mm anuales) concentradas generalmente en los meses de septiembre y noviembre, con altos niveles de evaporación, lo que genera sequedad en el suelo y limita los recursos hídricos superficiales.

La hidrografía está marcada por ríos como el Ranchería y cursos de agua intermitentes, complementados por manantiales y reservas subterráneas de difícil acceso. Los suelos son variados, desde aluviales y eólicos poco evolucionados hasta aquellos con procesos avanzados como la rubefacción y acumulación de carbonatos, reflejando condiciones climáticas actuales y pasadas. Estos aspectos resaltan el desafío de manejar recursos naturales en un entorno árido, al tiempo que subrayan el potencial de exploración en esta región estratégica y diversa.

En el área de estudio se identificaron visualmente más de 300 estructuras asociadas con círculos de hadas. Estas se caracterizan por su forma circular, textura lisa y homogénea en el centro, y la presencia de vegetación en el interior, lo que sugiere un contenido de humedad elevado o la presencia de agua que permite el mantenimiento de la vegetación. Se realizó una clasificación preliminar de los círculos de hadas en tres tipos, según sus características visuales:

- **Tipo A:** Círculos con forma circular o elíptica de suelo desnudo, concentración de agua en el centro y rodeados por un anillo homogéneo de vegetación (pastizal, arbustal o arbórea).

- **Tipo B:** Círculos similares en forma, con agua en el centro, pero con bordes irregulares de vegetación o suelo erosionado.
- **Tipo C:** Círculos de forma circular o elíptica con vegetación difusa en el borde o rodeados de suelo erosionado.

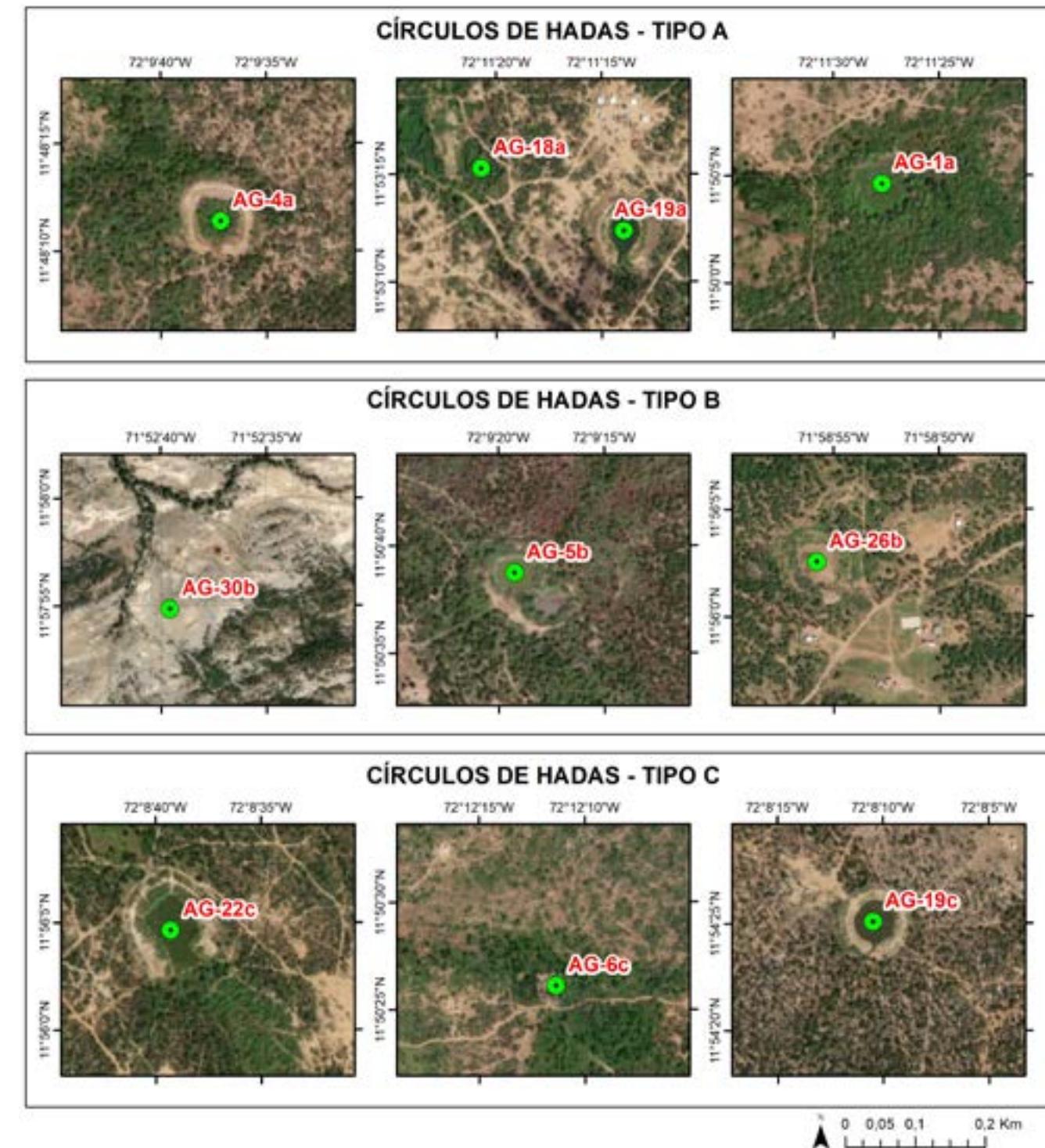


Figura 3.1 Imágenes satelitales de los posibles círculos de hadas en la Alta Guajira. Estas estructuras están codificadas con los sufijos a, b o c, según el tipo de círculo de hadas clasificado en el presente estudio.

CAPÍTULO 4

Geología, la base en toda exploración

La deformación generada por la Placa del Caribe en el margen norte de América del Sur ha generado estructuras tipo graben y horst al norte de la Falla de Cuisas, creando sierras elevadas y depresiones que contienen depósitos cenozoicos, los cuales recientemente han sido afectados por una inversión tectónica. En la Alta Guajira, aflora un complejo basamento de rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias de edades que van desde el Proterozoico hasta el reciente, destacándose unidades como los neises de Jojoncito y Macuira, y formaciones ígneas y sedimentarias de diversas épocas. Estas rocas, con texturas y composiciones específicas, revelan una historia tectónica y sedimentaria compleja con eventos de rifting, transtensión y levantamiento andino, reflejando procesos metamórficos, intrusivos y deposicionales a lo largo de millones de años.

En la zona de estudio, destacan anomalías como:

1. Macizos rocosos fracturados con minerales primarios ricos en hierro (hornblenda) y secundarios (siderita), relevante en la producción de hidrógeno por hidratación hidrotermal.
2. Altos contenidos de hierro en hornblenda asociada al Neis de Macuira.
3. Concentraciones de hematita y goetita en las Formaciones Uitpa y Jimol, en la depresión Cosinetas.
4. Serpentinita en depósitos cuaternarios y el Complejo Metamórfico Etpana, en la depresión Portete.

La Alta Guajira presenta una amplia variedad de depósitos recientes, que incluyen abanicos y coluviones, depósitos lagunares, de cauce aluvial, evaporíticos, eólicos, llanuras de inundación e intermareas. Las unidades sedimentarias del Cenozoico están ampliamente distribuidas en esta región y corresponden a rocas esencialmente calcáreas, depositadas en ambientes marinos someros asociados a frentes de playa que se extienden entre los

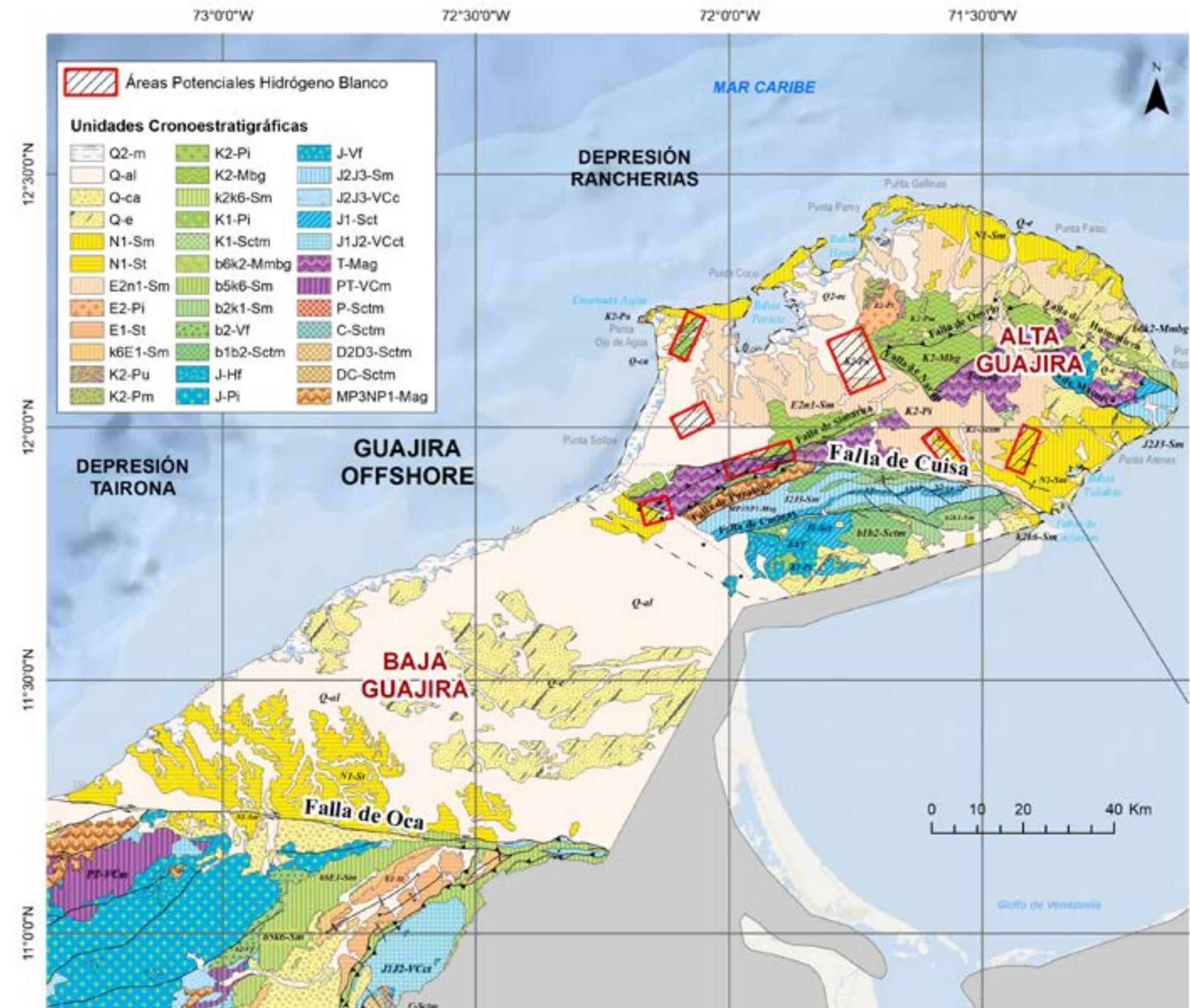


Figura 4.1 Geología regional del área de estudio a escala 1:100.000, con áreas priorizadas. Compilación basada en las Planchas 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10 y 10B del Servicio Geológico Colombiano (Zuluaga et al., 2008a, 2008b, 2008c, 2008d, 2008e, 2008f, 2008g, INGEOMINAS y Alama Mater GPR Lta, 2009).

corredores intramontanos de las Serranías de Jarara, Macuira y Cosinas. Entre las formaciones reportadas para el Cenozoico se encuentran la Formación Macarao, de edad Eoceno; la Formación Siamana, correspondiente al Oligoceno temprano a tardío; la Formación Uitpa, con una edad de Oligoceno a Mioceno; la Formación Jimol, del Mioceno medio, y la Formación Castilletes, asignada al Mioceno medio a tardío (Rollins, 1965).

El sistema Cretácico se manifiesta ampliamente en la parte sur de la Alta Guajira, particularmente en el sector de la Serranía de Cosinas, al sur de la Falla de Cuisa. Según Rollins (1965), las rocas cretácicas corresponden a diversos pulsos de la ingresión del mar Cretácico en toda la cuenca colombiana.

Predominan las bioesparitas depositadas en ambientes marinos someros de frente de playa medio o superior, con episodios de profundización como el registrado durante el Turoniano. No obstante, en la fase inicial de la sedimentación cretácica se presentan litologías esencialmente clásticas, asociadas a ambientes fluviales de alta energía, que están incluidas en la Formación Palanz, de edad Berriásano-Hauteriviano.

Las edades de las unidades sedimentarias varían desde el Triásico hasta el Plioceno (Renz, 1960; Rollins, 1965). Estas incluyen el Grupo Cojoro, que integra las Formaciones Rancho Grande y Uitpana, de edad Triásico a Jurásico Inferior, así como el Grupo Cocinas, conformado por las Formaciones Cheterlo,

Cajú, Chinapa y Cuisa, que abarcan desde el Jurásico Inferior hasta el Titoniano.

En lo que concierne a las rocas duras, la de tipo ígneo Las rocas ígneas afloran en el sector de la Serranía de Macuira, La Teta, Parashi y la parte oriental de la Serranía de Cosinas. Estas corresponden a la Granodiorita de Siapana, que según Radelli (1962) y MacDonald (1964), está compuesta principalmente por cuarzo anhedral, oligoclasa, ortosa, microclina y biotita. La temporalidad de estas unidades ígneas, basada en relaciones de campo con unidades suprayacentes, incluye la Tonalita de Cosinas (Zuluaga et al., 2009), la Riodacita de Ipapure-Cerro y la Granodiorita de Ipapure (MacDonald & Oddyke, 1972), así como la Cuarzodiorita de Parashi (Lockwood, 1965).

Las rocas más antiguas del basamento de la cuenca corresponden al Neis de Jojoncito, de edad Precámbrica, datada en 1260 Ma en circón (Cordani et al., 2005), y al Neis de Macuira, conformado por neises cuarzofeldespáticos y anfibólicos que

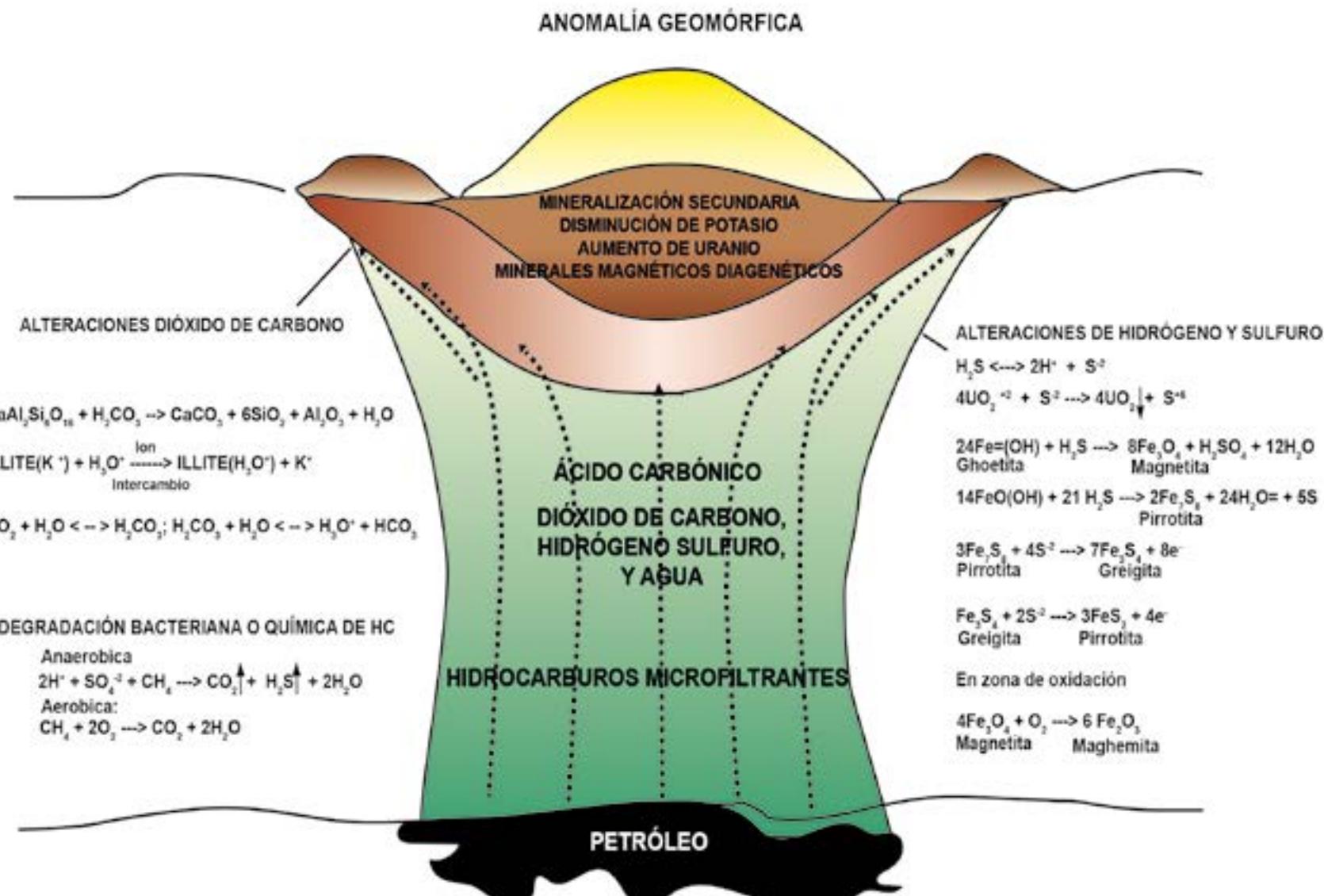


Figura 4.2 Modelo de alteración superficial asociado a la presencia de hidrocarburos. Modificado de Souza (2008), basado de Saunders et al. (1999).



Figura 4.3 Geología regional del área de estudio a escala 1:100.000, con áreas priorizadas. Compilación basada en las Planchas 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10 y 10B del Servicio Geológico Colombiano (Zuluaga et al., 2008a, 2008b, 2008c, 2008d, 2008e, 2008f, 2008g, INGEOMINAS y Alama Mater GPR Lta, 2009).

alcanzan una edad máxima Ordovícica. El enfriamiento del evento metamórfico principal asociado a estas rocas se ha documentado entre 210 y 230 Ma mediante dataciones Ar-Ar (Cardona et al., 2006).

El Neis de Jojoncito se presenta como un cuerpo masivo de color rojizo claro a blanco crema, con estructura néisica bien definida. Litológicamente, está compuesto principalmente por granulitas con altos contenidos de feldespato potásico y ausencia de moscovita primaria, así como por granulitas máficas, neises cuarzofeldespáticos, neises anfibólicos, pegmatitas y mármoles en menor proporción.

Por su parte, el Neis de Macuira aflora en la Serranía de Simarúa, Jarara y Macuira, formando un cinturón alargado con orientación noreste. Litológicamente, predominan los neises cuarzofeldespáticos y anfibólicos, aunque también se encuentran neises bióticos, anfibolitas, esquistos micáceos, migmatitas, pegmatitas y mármoles (Zuluaga et al., 2009).

Adicionalmente, se identifican los Esquistos de Ipanaruhu, las Serpentinitas del Cabo de la Vela y las Cuarcitas de Carpintero, a las cuales se les asigna una edad del Cretácico superior. Estas unidades se localizan en sectores de la Serranía de Simarúa, Jarara y Macuira, donde aparecen como pequeñas ventanas en áreas intramontanas.

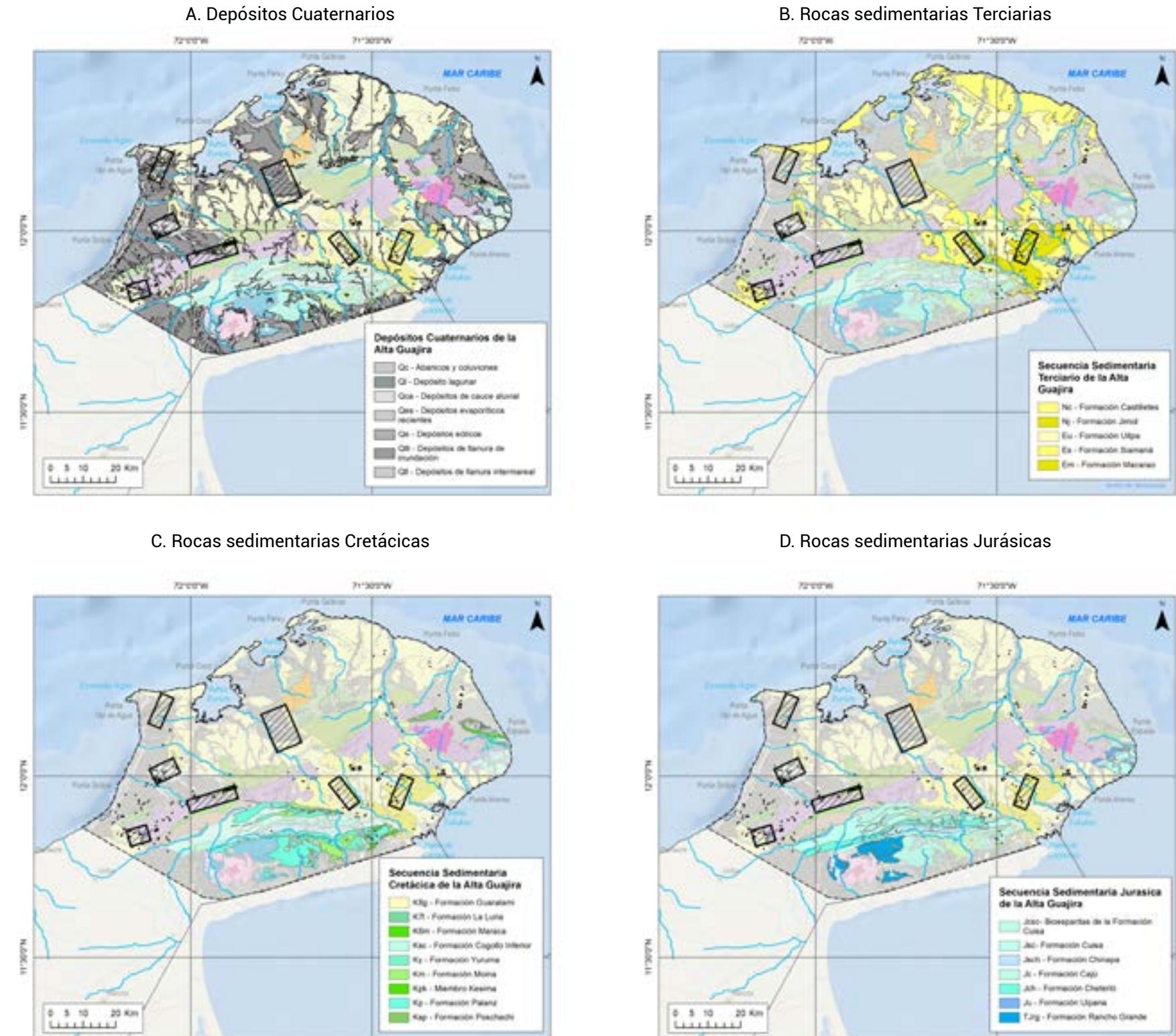
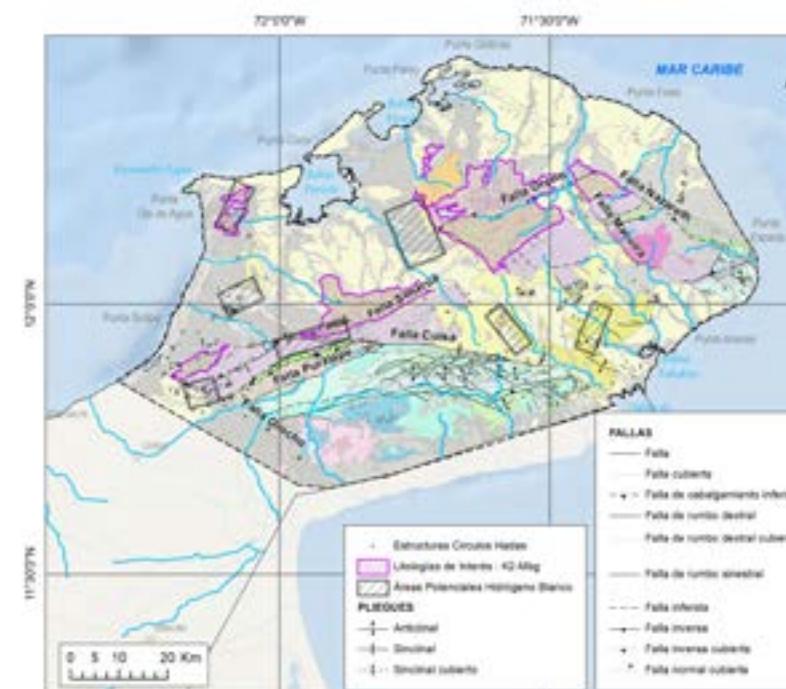
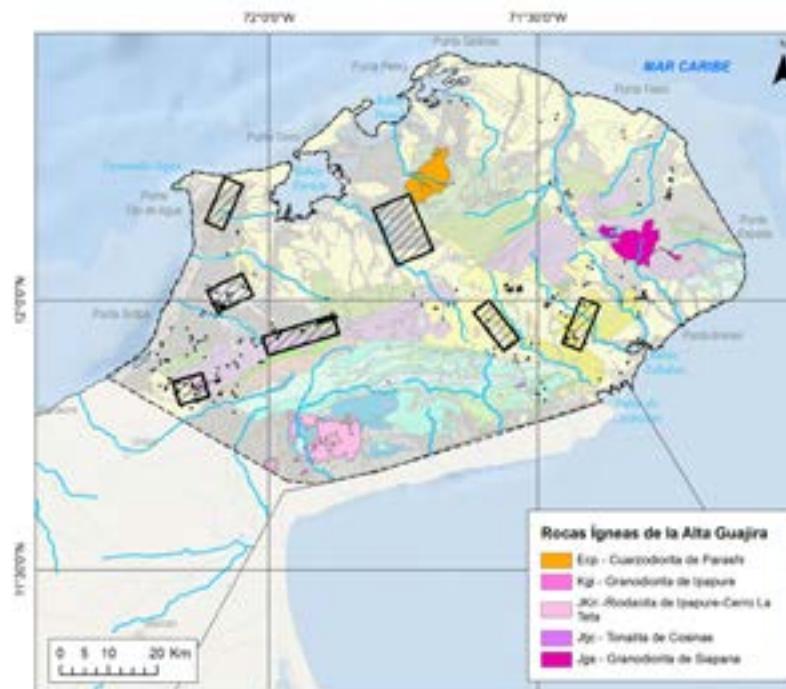


Figura 4.4 Distribución de litologías sedimentarias en la superficie del área de estudio, que corresponden a depósitos del Cuaternario (A), rocas del Terciario (B), rocas del Cretácico (C) y rocas del Jurásico (D).

A. Rocas ígneas



B. Rocas metamórficas

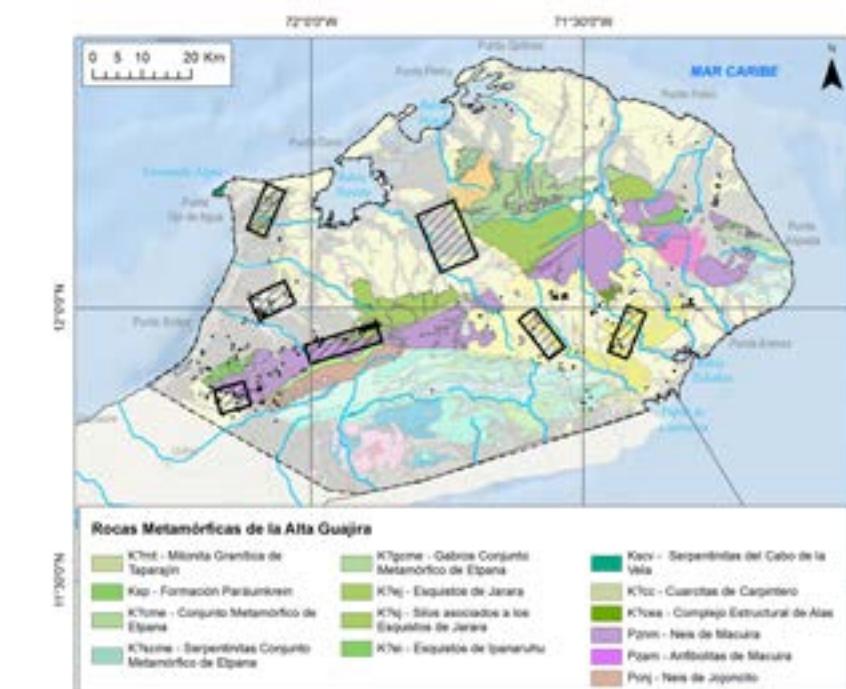


Figura 4.5 Localización de las rocas de interés con potencial en la generación de hidrógeno natural en el área de estudio.

Figura 4.6 Distribución en superficie de las litologías correspondientes a rocas ígneas (A, izquierda) y rocas metamórficas (B, derecha).



Fotografía: Manuel Zafra.



Fotografía: Ana Berrio

CAPÍTULO 5

La forma del terreno como factor clave

Los Modelos Digitales de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) son la base del análisis de morfometría para caracterizar y estudiar la superficie terrestre mediante parámetros como curvatura, pendiente, rugosidad e Índice de Humedad del Terreno (IHT). Permitiendo identificar relaciones entre características geomorfológicas y procesos geológicos, como la emisión de hidrógeno natural.

En otros círculos de hadas identificados en el mundo se ha resaltado la importancia de características geomorfológicas asociadas a círculos de hadas, para detectar áreas donde se acumulan agua y gases, y comprender su impacto en fenómenos como los círculos de hadas.

Parámetros como la curvatura, que mide la concavidad o convexidad del terreno, y la rugosidad, que indica variaciones en la superficie, son determinantes para analizar la distribución de agua, gases y vegetación. La pendiente, por su parte, influye en el drenaje y acumulación de fluidos, siendo crucial en el reconocimiento de estructuras asociadas a emisiones de hidrógeno. Este análisis geomorfológico integral permite no solo identificar zonas potenciales de emisión y acumulación de gases, sino también explorar cómo estas dinámicas afectan procesos ecológicos y geológicos locales.

El análisis de la morfometría se centra en el estudio cuantitativo de la superficie terrestre, evaluando medidas como longitud, área, forma y pendiente. Según el SGC (2017), existen

dos enfoques en morfometría: (i) Morfometría específica, el cual se enfoca en rasgos discretos del terreno, como las formas del relieve. (ii) Morfometría general, la cual aborda características continuas de la superficie.

La exploración de hidrógeno blanco en la Alta Guajira adquiere relevancia por las características geomorfológicas de la región, que incluyen terrenos planos, rugosidad variable y zonas cóncavas, las cuales favorecen la acumulación de agua y gases en el subsuelo. Estas áreas se analizaron haciendo uso del DEM, para identificar estructuras geológicas de interés, incluyendo depresiones conocidas como círculos de hadas. Aunque su relación con la emisión de hidrógeno requiere más

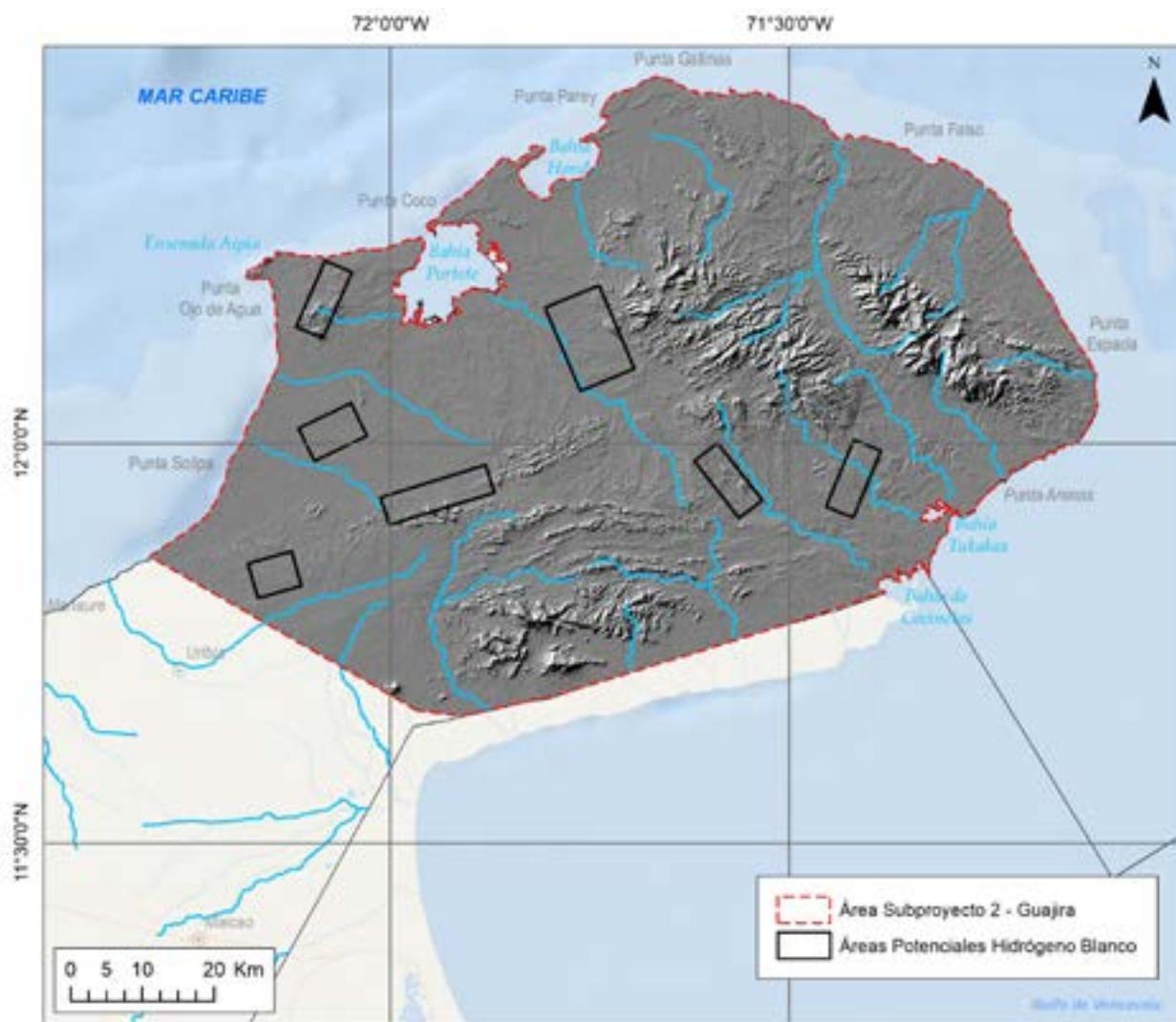


Figura 5.1 Mapa de sombras del área de estudio, donde se evidencian las elevaciones topográficas correspondientes al Alto de Carpintero, la Serranía de Cosinas, la Serranía del Jarara y la Serranía del Macuira.

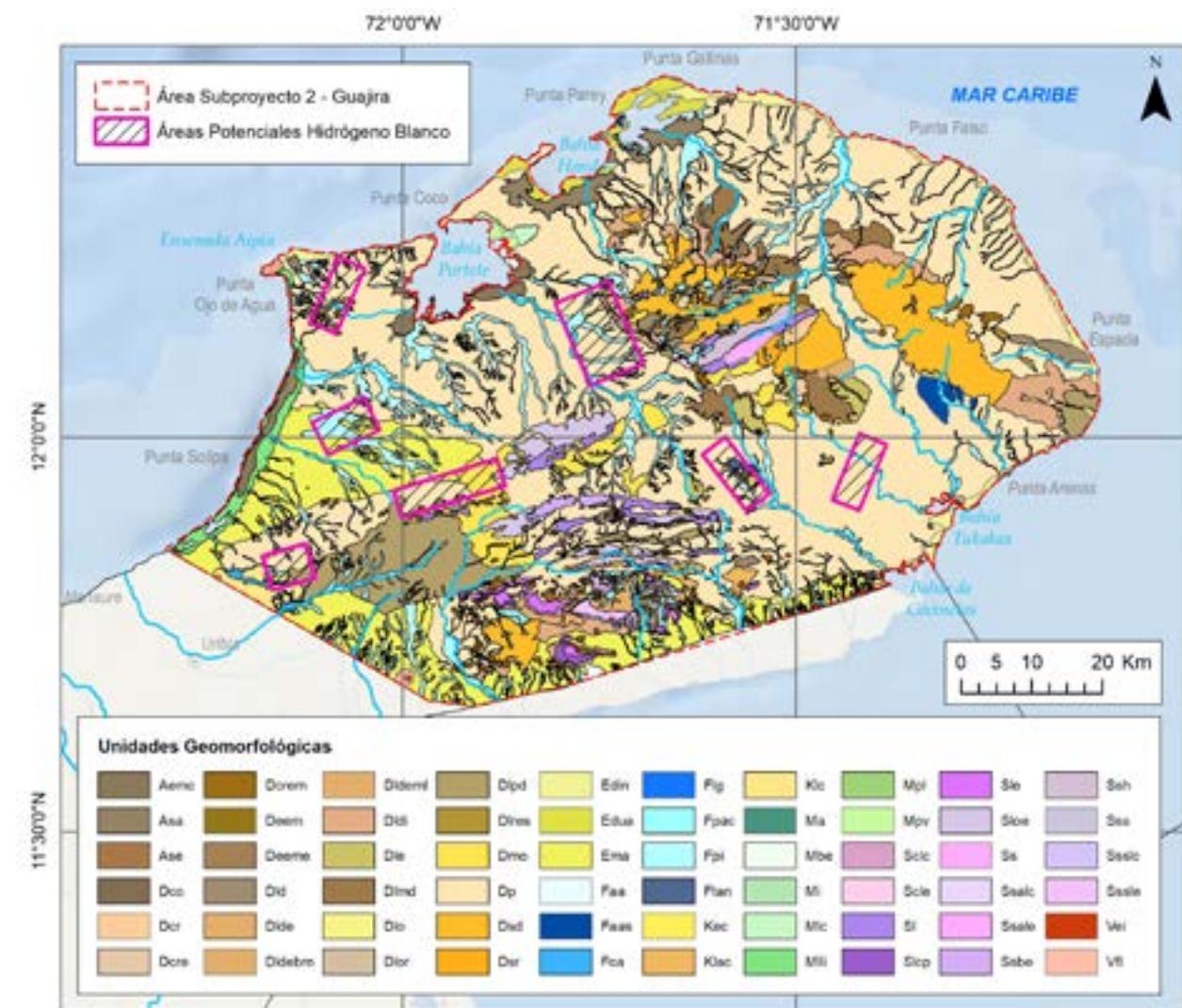
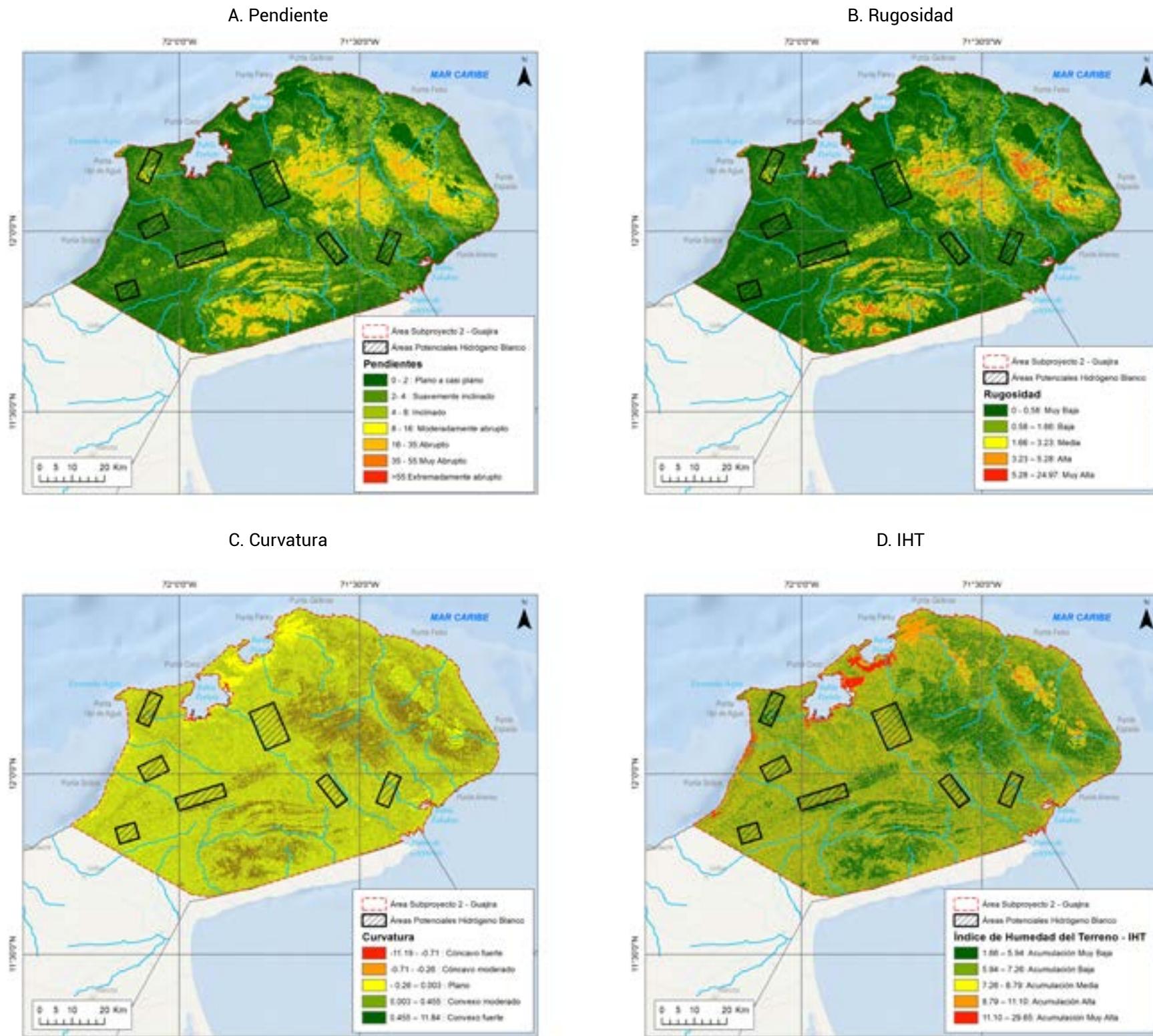


Figura 5.2 Estructuras geomorfológicas del área de estudio.



estudios, su presencia está asociada a condiciones topográficas y geológicas óptimas. La pendiente de los círculos de hadas se caracteriza por ser inferior al 5% (Moretti et al., 2021a; Moretti et al., 2022).

La Alta Guajira podría albergar concentraciones significativas de hidrógeno blanco, posicionándola como un área clave para investigaciones orientadas a energías sostenibles.

- La pendiente del terreno influye en la circulación y drenaje del agua, zonas con pendientes altas limitan la acumulación de agua, por el contrario, zonas planas permiten la acumulación del agua y por ende es más probable que fluidos y/o gases emitidos por estructuras geológicas se acumulen en estas zonas.
- La rugosidad del terreno se refiere a las variaciones en la superficie del suelo, que pueden influir en la distribución de la vegetación. La formación de estructuras de emisión H₂ pueden estar relacionadas con la disponibilidad de agua y de la vegetación en respuesta al estrés hídrico.
- Las zonas cóncavas, identificadas a través del análisis de curvatura en ArcGIS, son áreas con depresiones en el terreno, lo que puede facilitar la acumulación de agua y la concentración de gases.
- El Índice de Humedad Topográfica (IHT) se presenta como una variable eficaz para identificar y analizar la distribución de zonas con alta humedad en el suelo, lo cual podría estar vinculado a la detección de círculos de hadas en áreas específicas.

Figura 5.3 Variables de morfometría correspondientes a pendiente (A), rugosidad (B), curvatura (C) e Índice de Humedad del Terreno (IHT) (D), calculados para el área de estudio.



Fotografía: Jaír Ramírez Cadena

CAPÍTULO 6

Exploración indirecta: Geofísica

Anomalía Magnética reducida al polo

El uso de mapas de anomalías magnéticas permite identificar zonas potenciales con presencia o ausencia de minerales ferromagnéticos. Estos datos pueden asociarse con la geología para identificar posibles alteraciones que estén generando una disminución del potencial magnético de las rocas.

Las anomalías magnéticas positivas están relacionadas con la presencia de rocas que contienen minerales ferromagnéticos o metálicos, los cuales responden al campo magnético

terrestre, indicando potencialmente la existencia de material ígneo o metamórfico. Por otro lado, las anomalías magnéticas negativas suelen estar asociadas a rocas no magnéticas, principalmente depósitos sedimentarios o áreas con materiales de baja susceptibilidad magnética.

En la literatura, se ha relacionado la generación de hidrógeno natural con el flujo de agua a través de rocas que contienen hierro. Por ello, las áreas de interés magnético corresponden al Alto de Carpintero, próximo a Portete, y en la Serranía de Cosinas, donde los cuerpos están influenciados por las fallas Kasipoch, Puralape y Cuisa.

Anomalía de Bouguer total

Las anomalías gravimétricas se obtienen al considerar un valor de referencia para el comportamiento del sistema terrestre. Valores positivos están asociados con rocas de mayor densidad respecto a este valor de referencia, mientras que valores negativos indican la presencia de rocas con densidades inferiores a la referencia.

En la región de la Alta Guajira, la anomalía de Bouguer es predominantemente positiva, lo que sugiere la presencia de materiales rocosos con densidades superiores al valor de referencia,

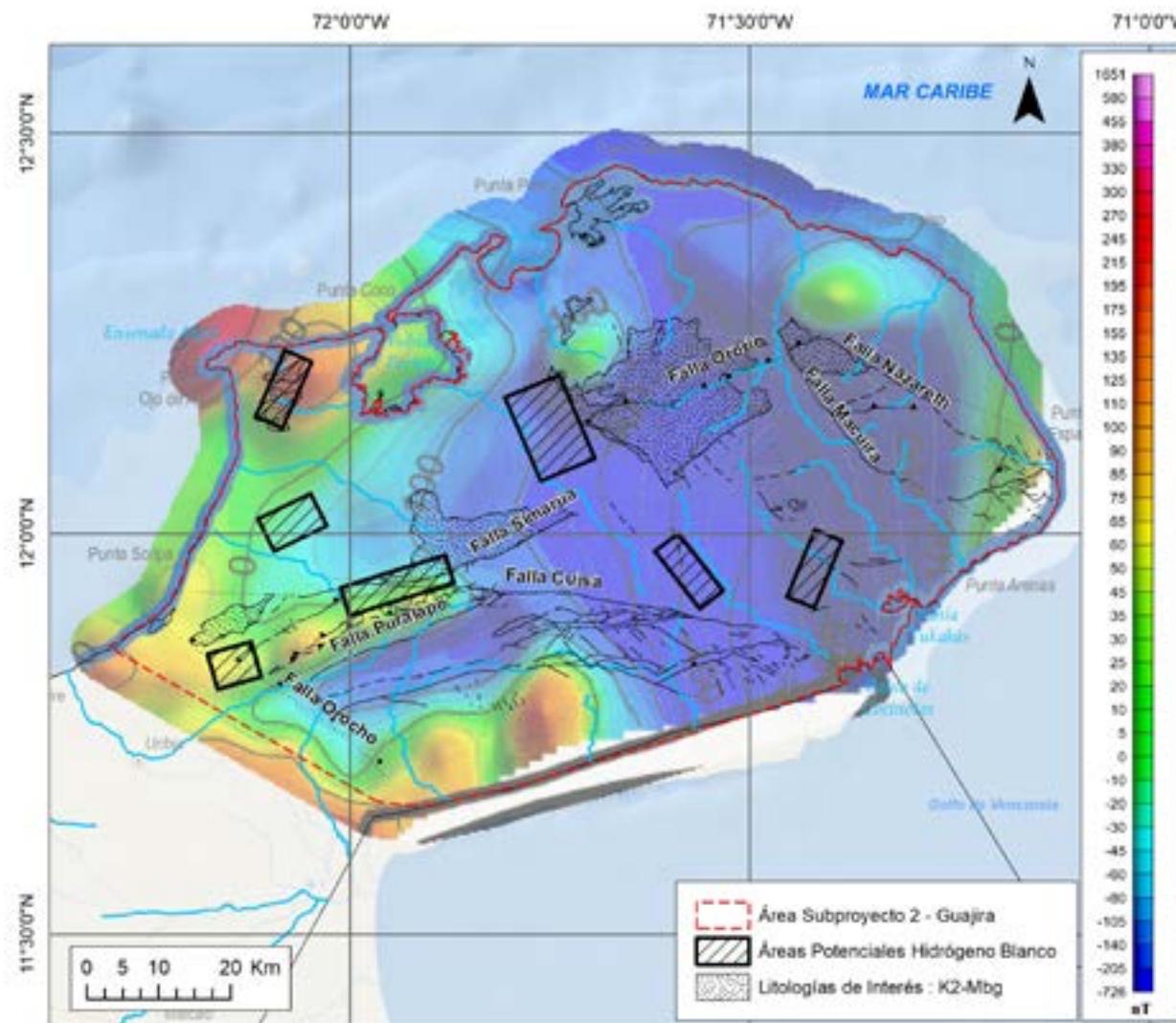


Figura 6.1 Anomalía de Intensidad Magnética Total Reducida al Polo en el área de estudio, donde se evidencian altos magnéticos asociados a litologías con minerales ferromagnéticos. Modificado de ANH (2024a).

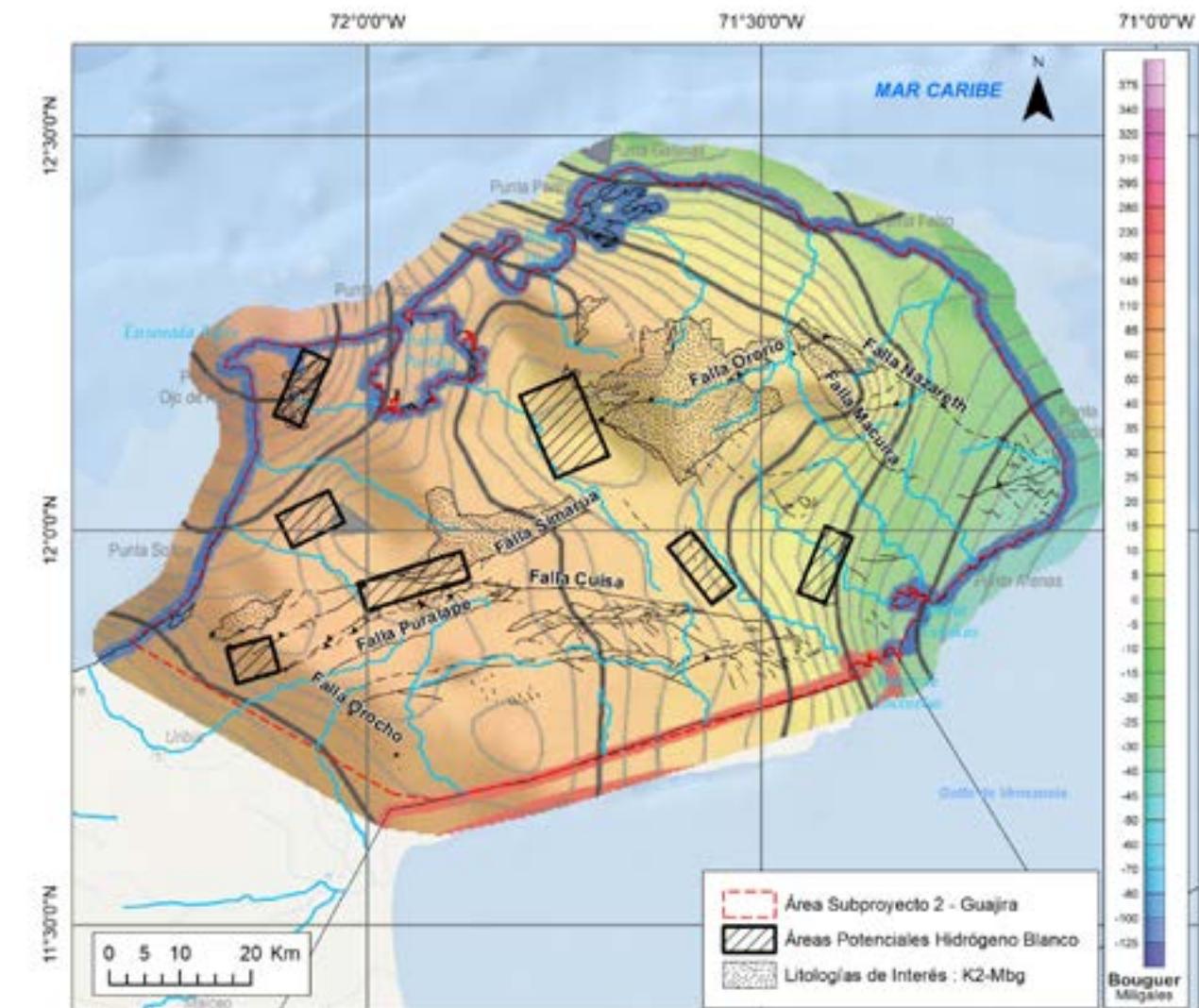


Figura 6.2 Mapa de Anomalía Bouguer Total para el área de estudio, donde se evidencian valores positivos al oeste del área, correspondientes a material rocoso más denso que el de referencia. Modificado de ANH (2024b).

establecido en 2.67 g/cm³. Una disminución en estos valores podría indicar una reducción en la densidad de las rocas hacia valores más cercanos al de referencia o, alternativamente, la posible presencia de cuencas sedimentarias. La ubicación de los altos gravimétricos se encuentra en el sector oeste del área de estudio, correspondiente al Alto de Carpintero, Portete y la Serranía de Cosinas.

Esto muestra coherencia con las anomalías magnéticas y sugiere la presencia de cuerpos ígneos y metamórficos más someros en esta zona. En contraste, en el sector este, donde se observa una disminución de los valores gravimétricos, se infiere la presencia de materiales predominantemente sedimentarios.



Fotografía: Jaír Ramírez Cadena

CAPÍTULO 7

Exploración de hidrógeno en el mundo

La exploración de H₂ se ha realizado en otras regiones del mundo, iniciando en sectores próximos a la explotación de hidrocarburos. En general, se trata de estudios para la identificación de círculos de hadas o estructuras asociadas a hidrógeno natural. El procedimiento, como se presenta a continuación:

1. Selección de una zona de interés basada en anomalías visibles, como círculos de hadas, y factores geológicos clave (hidrocarburos, rocas máficas, fallas, flujo subterráneo).
2. Descarga y análisis de información satelital, DEM, geología y geofísica para caracterizar y delimitar áreas con mayor potencial de estudio.
3. Cálculo de índices espectrales en imágenes de satélites Landsat y Sentinel, enfocados en vegetación, pendiente y morfometría para diferenciar las depresiones de otras estructuras naturales.
4. Muestreo en campo, midiendo la concentración de hidrógeno en perfiles que cruzan las estructuras para identificar picos y analizar características del suelo como posibles sellos para el flujo de hidrógeno.
5. Análisis en laboratorio de las muestras recolectadas para evaluar gases, minerales y propiedades del suelo.
6. Confirmación de la estructura como un círculo de hadas mediante integración de datos de campo y laboratorio. Y,
7. Instalación de una estación de monitoreo continuo en las estructuras validadas.

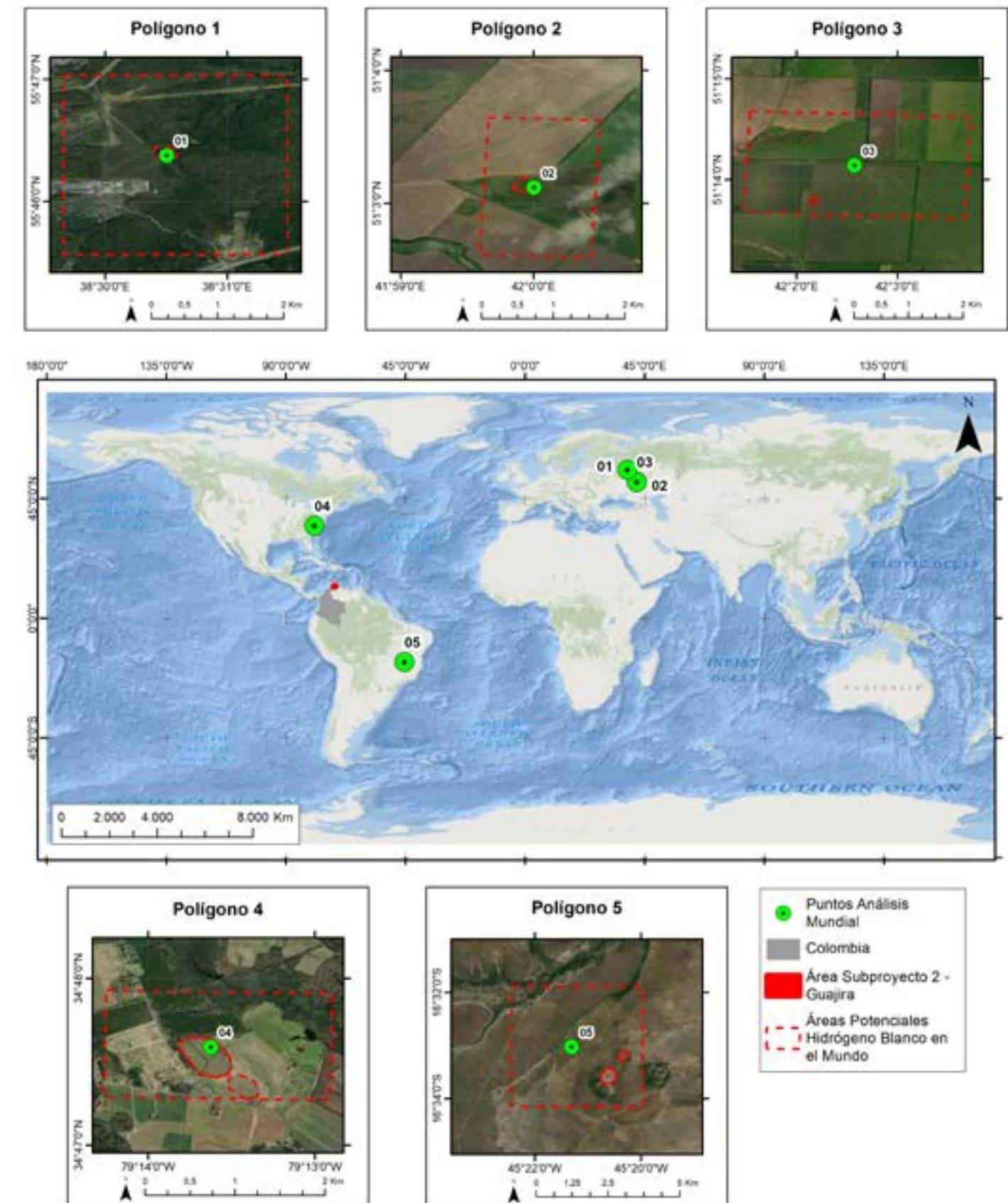


Figura 7.1 Localización de las cinco áreas en el mundo utilizadas como referencia para el entrenamiento de los modelos de Machine Learning con los satélites Landsat 8 y Sentinel-2. Las áreas con evidencias de círculos de hadas fueron tomadas de McMahon et al. (2023), quienes compilan 19 puntos con presencia de círculos de hadas en todo el mundo. Las cinco áreas corresponden respectivamente a estos puntos de la siguiente manera: Área 01 con el Punto 1; Área 02 con el Punto 2; Área 03 con el Punto 5; Área 04 con los Puntos 8 y 11; Área 05 con los Puntos 14 y 15.

Sistema de Hidrógeno

El "sistema de hidrógeno", describe la generación, migración y sellado/atrapamiento del hidrógeno (Jackson et al. 2004). Este se presenta como un análogo del "sistema del petróleo" utilizado para comprender la generación y migración del petróleo (Magoon y Dow 1994). El sistema petrolero proporciona información sobre el paradigma de la "trampa de migración de origen" y se ha empleado para guiar la exploración petrolera desde los años 1970 y 1980. El otro concepto útil, pero más antiguo, es el de "zona de exploración", que reconoce la combinación de condiciones geológicas que controlan la acumulación de petróleo en una provincia particular o un grupo de yacimientos de petróleo o gas (Allen y Allen, 2005). En este sentido, la exploración de hidrógeno puede beneficiarse del conocimiento obtenido a lo largo de más de 100 años de exploración petrolera.

Se destacan dos diferencias importantes entre el sistema petrolero y el sistema hidrógeno (Figura 7.2):

- En el sistema de hidrógeno, la roca madre (o protólito) suele estar ubicada en rocas del basamento y geológicamente separada de los sedimentos por los que migrará. La roca madre de petróleo se encuentra dentro de la cuenca y el sistema petrolero forma parte de la dinámica de la cuenca.
- La generación de hidrógeno por serpentinización puede considerarse geológicamente "instantánea". Los hidrocarburos se generan a partir de rocas madre de petróleo en un período de entre un millón y decenas de millones de años (Tissot y Welte, 2013).

El "sistema de hidrógeno" tiene dos partes: el "subsistema de generación de fuentes" requiere un protólito ultramáfico, generalmente en el basamento y, un suministro de agua que penetre en las rocas del basamento (Jackson et al. 2004; Moretti et al. 2023; Lévy, et al. 2023; Dodson, 2024). En el "subsistema de migración-retención", la migración, el sellado y el atrapamiento del hidrógeno en fase gaseosa se comportan de la misma manera que para los gases de hidrocarburos (Jackson et al. 2004).

Generación y expulsión

En cualquier fase, la expulsión de hidrógeno del protólito será asistida por fracturación inducida por reacción (Zhang et al. 2019; Renard, 2021). Las etapas iniciales de serpentinización

están acompañadas por un aumento de volumen que conduce al desarrollo de una red de vetas en forma de malla (Cannat et al. 2019). La fracturación también puede ocurrir después de la serpentinización anterior, con textura de malla (Rouméjon et al. 2015). Se especula que la expulsión de hidrógeno también puede ser asistida por fracturación tectónica relacionada con fallas. A menudo, este será el mismo sistema de falla-fractura que permitió que el agua llegara al protólito. Algo de hidrógeno puede ser expulsado en solución en celdas de convección que pueden formarse dentro de zonas de falla permeables que unen la cuenca y el basamento (Yang, 2006). El "enlace advectivo" se forma cuando el hidrógeno se mueve con el agua en solución a lo largo de zonas de falla como se describe, y/o por migración en fase gaseosa a través de redes de fracturas del basamento, donde podría quedar atrapado o moverse hacia sedimentos adyacentes.

Subsistema de retención de migrantes

Migración:

Una vez que el hidrógeno ha accedido a los sedimentos a través del "enlace advectivo", migrará a través del medio poroso

mediante los mismos mecanismos que cualquier gas (e.g., el metano). Estos son:

- Advección en la fase gaseosa impulsada por la presión (flotabilidad) y descrita por la Ley de Darcy.
- La advección en solución también es impulsada por gradientes de presión.
- Difusión en solución a nivel molecular, impulsada por gradientes de concentración y descrita por la Ley de Fick.

Sellado/Atrapamiento:

El "sistema de hidrógeno" funciona de la misma manera que un sistema petrolero propenso al gas (Jackson et al., 2004). Aunque el hidrógeno es más móvil que por ejemplo al metano, estará sellado por litologías impermeables similares y puede retenerse en trampas a lo largo de marcos temporales geológicos. Además, el hidrógeno tiene el potencial de recargar las trampas donde la reacción de serpentinización está en curso o es reciente. Los escenarios de trampas estarán formados por el sello del yacimiento o en presencia del sistema acuitardo/acuíclido que tenga una configuración de trampa estructural o estratigráfica adecuada.

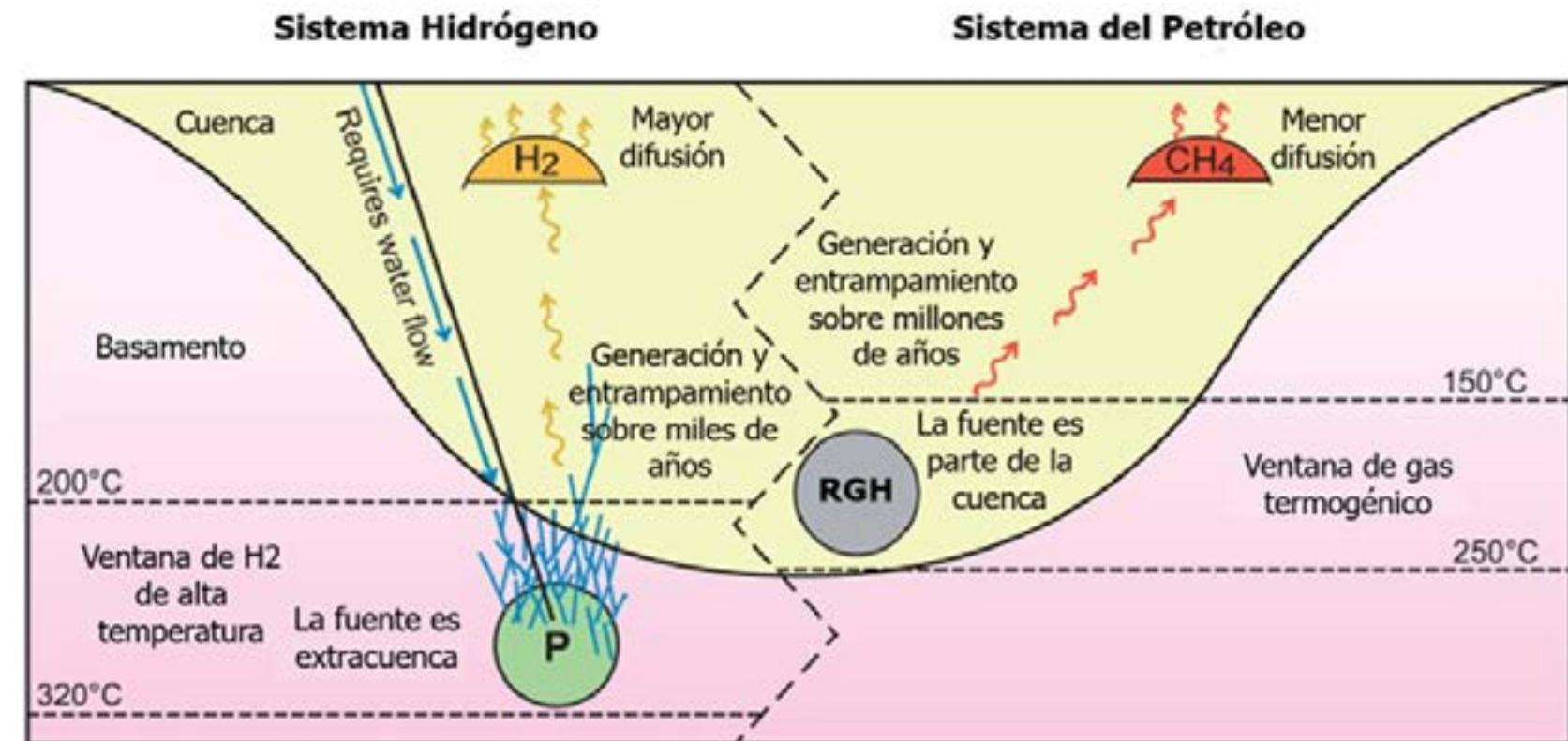


Figura 7.2 Sistema hidrógeno vs sistema del petróleo. Una comparación de los sistemas de fluidos destacando las diferencias en la naturaleza y localización de la fuente respecto a los sedimentos hospedantes. RGH: roca.

CAPÍTULO 8

Imágenes satelitales: Primer
acercamiento a los círculos de hadas

CAPÍTULO 8

Imágenes satelitales: Primer acercamiento a los círculos de hadas

La exploración de áreas con potencial de hidrógeno natural y expresiones superficiales asociadas con círculos de hadas en la Alta Guajira se llevó a cabo utilizando imágenes satelitales de múltiples plataformas:

- Landsat 8: 469 imágenes adquiridas entre 2013 y 2024.
- Landsat 9: 27 imágenes correspondientes al periodo 2021-2024.
- Sentinel-2: 51 imágenes obtenidas entre 2015 y 2024.
- ASTER: 109 imágenes descargadas entre 2015 y 2024.

Todas las imágenes seleccionadas cumplieron con el criterio de un límite máximo del 15% de nubosidad para garantizar

su calidad. Durante el proceso de generación de variables temáticas, se llevaron a cabo procedimientos de corrección, enmascarado de nubes y sombras, así como el tratamiento de datos atípicos.

Anomalías geobotánicas

La geobotánica es una rama de la biogeografía que integra conocimientos de biología, geografía, geología, teledetección y ciencias computacionales, entre otros.

Su principal enfoque es analizar las interrelaciones entre biomasa, hábitat y superficie terrestre, lo que permite describir, interpretar y predecir la distribución de comunidades y especies.

A través de índices generados, se facilita la interpretación de las variaciones en la vegetación. Dado que la vegetación es un indicador de los círculos de hadas y la presencia de hidrógeno natural, en el área de estudio se realizó un análisis espectral de la especie vegetal indicadora, el Trupillo (*Prosopis juliflora*). Además, se identificó la presencia de suelos blanqueados o alterados por la anomalía de hidrógeno natural, todo ello mediante la percepción remota utilizando diferentes sensores y algoritmos.

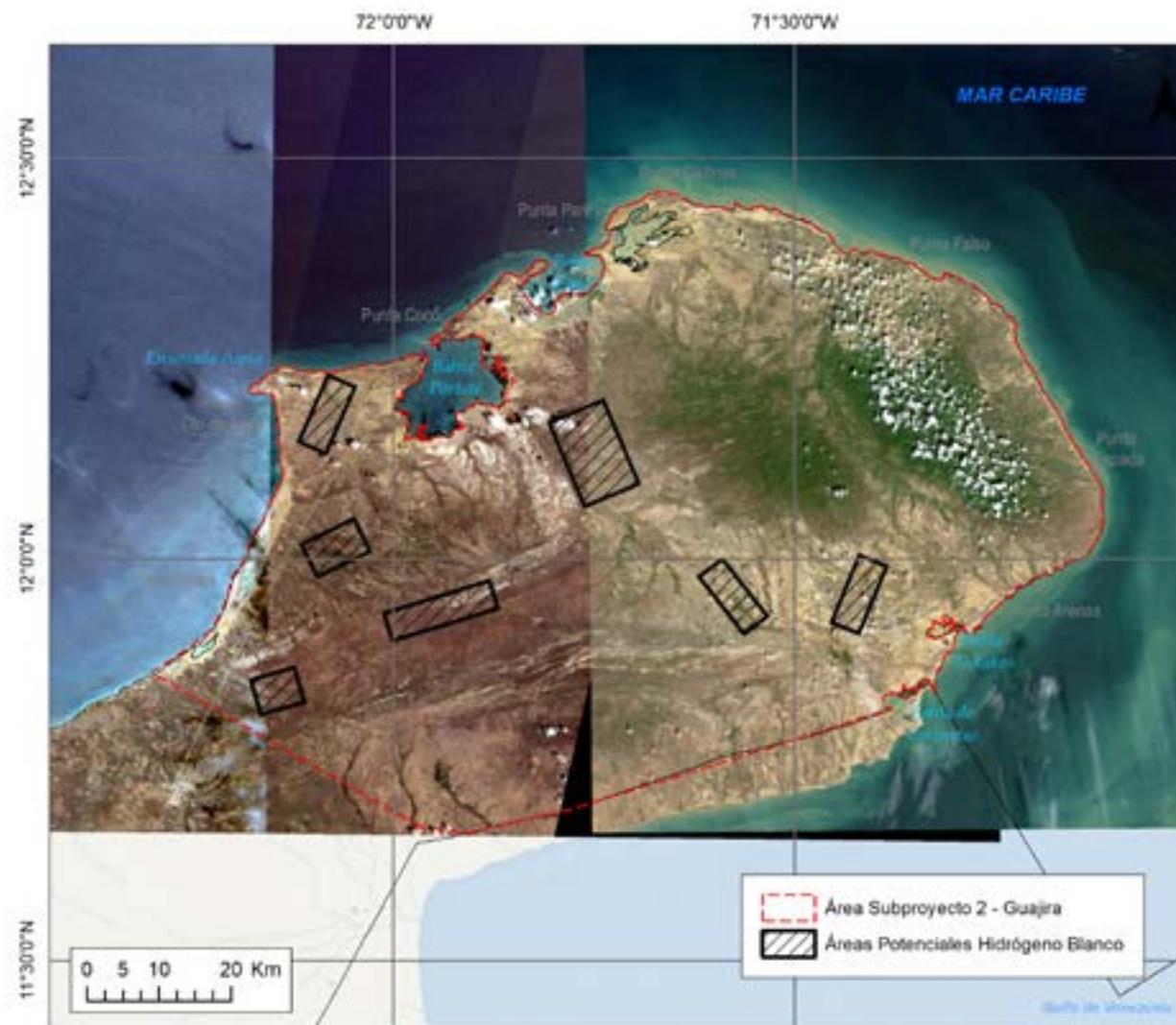


Figura 8.1 Cobertura de las escenas descargadas del satélite Sentinel-2, utilizadas para la generación de variables temáticas en el área de estudio. Tres escenas cubren el área de estudio, y en total se descargaron 51 imágenes.

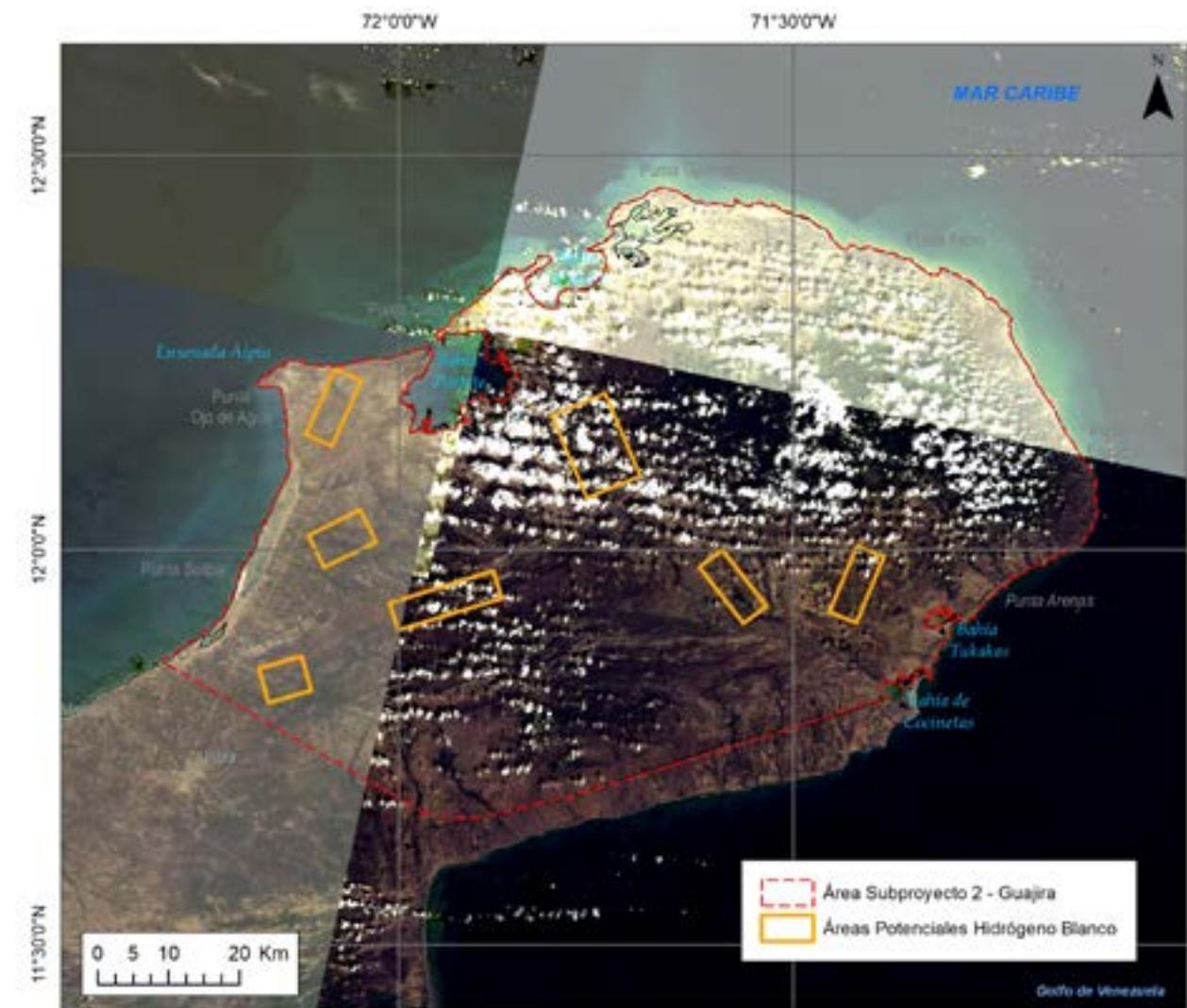


Figura 8.2 Cobertura de las escenas descargadas del satélite Landsat 8, utilizadas para la generación de variables temáticas. Para este satélite, cuatro escenas cubren el área, y en total se descargaron más de 400 imágenes.

La distribución espacial del Trupillo muestra una relación clara con rocas cristalinas como neises y esquistos, especialmente en las zonas norte y sur de la Falla de Cuisa, con un evidente control estructural. En las áreas con rocas sedimentarias, el Trupillo se ubica en las subcuenca situadas entre los cuerpos cristalinos, debido al transporte de nutrientes a través de torrentes de agua. Esta especie es resistente a la alteración por hidrógeno, localizándose en un halo exterior de los círculos de hadas, aunque con variaciones morfológicas debido a las condiciones anómalas del suelo.

Además, las alteraciones en la composición físico-química de los suelos, como los cambios en el pH y eH, producen respuestas

espectrales distintas en el sensor ASTER. El blanqueamiento de los suelos, inducido por la alcalinización y la pérdida de sustrato, favorece la movilidad de nutrientes y oxígeno, afectando tanto la cantidad como la calidad de la biomasa.

Localmente los círculos de hadas son una manifestación clara de estos procesos de alteración, con suelos severamente blanqueados y una estructura circular o semicircular. Las zonas centrales pueden presentar características estériles, mientras que el halo exterior alberga vegetación resistente a las nuevas condiciones del suelo y los cambios físico-químicos asociados con la anomalía de hidrógeno.

Persistencia de la Temperatura Superficial Terrestre (LST)

A través de imágenes satelitales se puede estimar la temperatura de la superficie terrestre (LST) utilizando datos espectrales de diversos sensores como Landsat o Aster. Este proceso implica varios pasos: obtención de bandas espectrales térmicas, ajustes geométricos y atmosféricos, y conversión de los números digitales en valores de radiancia. Además, se calcula el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) para corregir la temperatura de brillo y así obtener la LST final.

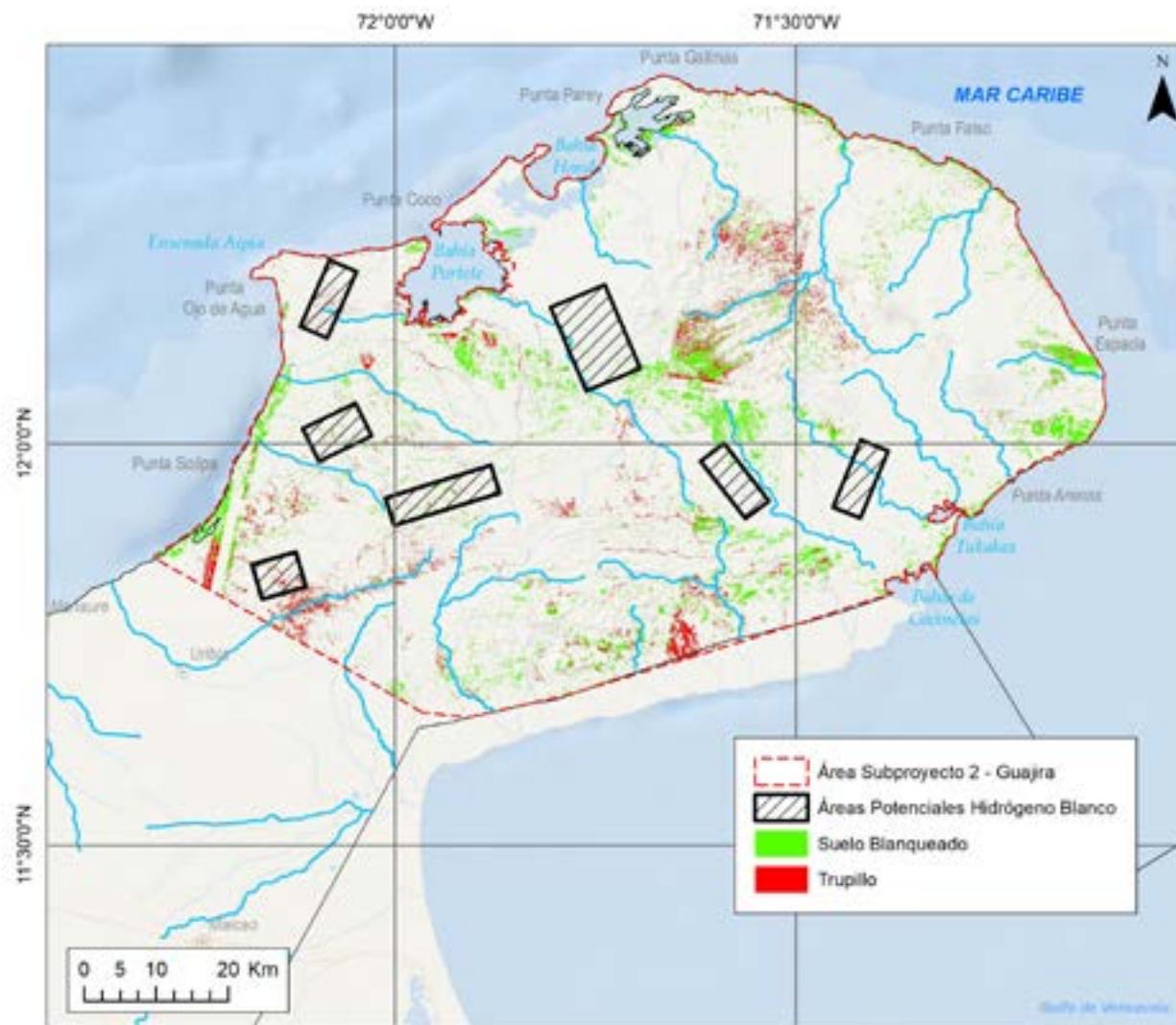


Figura 8.3 Localización de las áreas asociadas con suelos blanqueados y vegetación de trupillo, vinculadas a la presencia de círculos de hadas en el área de estudio.

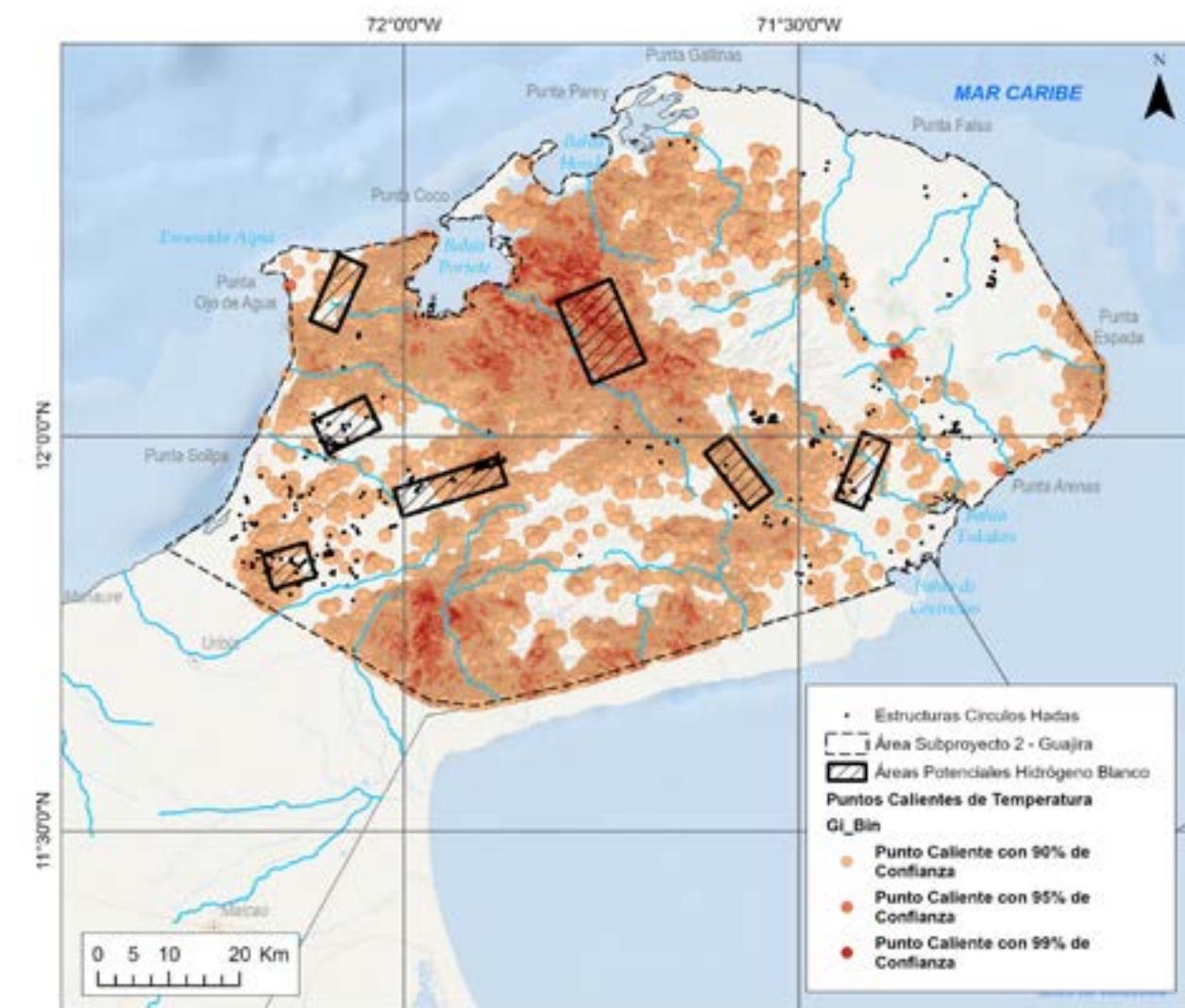


Figura 8.4 Distribución espacial de puntos calientes por persistencia de temperatura superficial terrestre entre 2013 y 2024.

La siguiente serie de mapas representan la LST para los años comprendidos entre 2013 y 2024, y cada mapa está coloreado para indicar variaciones de temperatura, donde los colores cálidos (rojos y naranjas) representan temperaturas más altas y los colores fríos (azules) representan temperaturas más bajas. En la tabla incluida observamos que las temperaturas máximas fluctúan entre los 56,2 °C y los 64,7 °C, mientras que las temperaturas mínimas oscilan entre 5,9 °C y 22,7 °C, a excepción de los valores mínimos anómalos encontrados para 2015 y 2021.

Este análisis permite observar tendencias y patrones en el calentamiento o enfriamiento de la superficie terrestre a lo largo del tiempo. Además, es ventajoso para la exploración de hidrógeno blanco, ya que permite identificar cambios térmicos que pueden indicar actividad geotérmica o recursos subterráneos.

Anomalías minerales

La elección de los minerales a examinar se realizó con base en las características composicionales y tipo de roca que se encuentran aflorando en el área de estudio. Neises, esquistos y rocas ígneas se agruparon en un grupo denominado: "rocas de ambiente cristalino" (biotita, hornblenda, crisotilo, pirofilita, clorita, illita – esmectita, talco, yeso, epidota y ortoclasa), y las rocas de "ambiente de cuenca" con sus respectivos minerales (dolomita, goethita, hematita, jarosita, magnesita, pirita y siderita), utilizando el algoritmo SAM (Spectral Angle Mapper).

Spectral Angle Mapper (SAM) es una clasificación espectral basada en la física que utiliza un ángulo n-D para hacer coincidir los píxeles con los espectros de referencia. El algoritmo determina la similitud espectral entre dos espectros calculando el ángulo entre los espectros y tratándolos como vectores en un espacio con una dimensionalidad igual al número de bandas, permitiendo una segmentación eficiente de la información obteniendo una respuesta espectral efectiva de las firmas que ingresan al modelo.

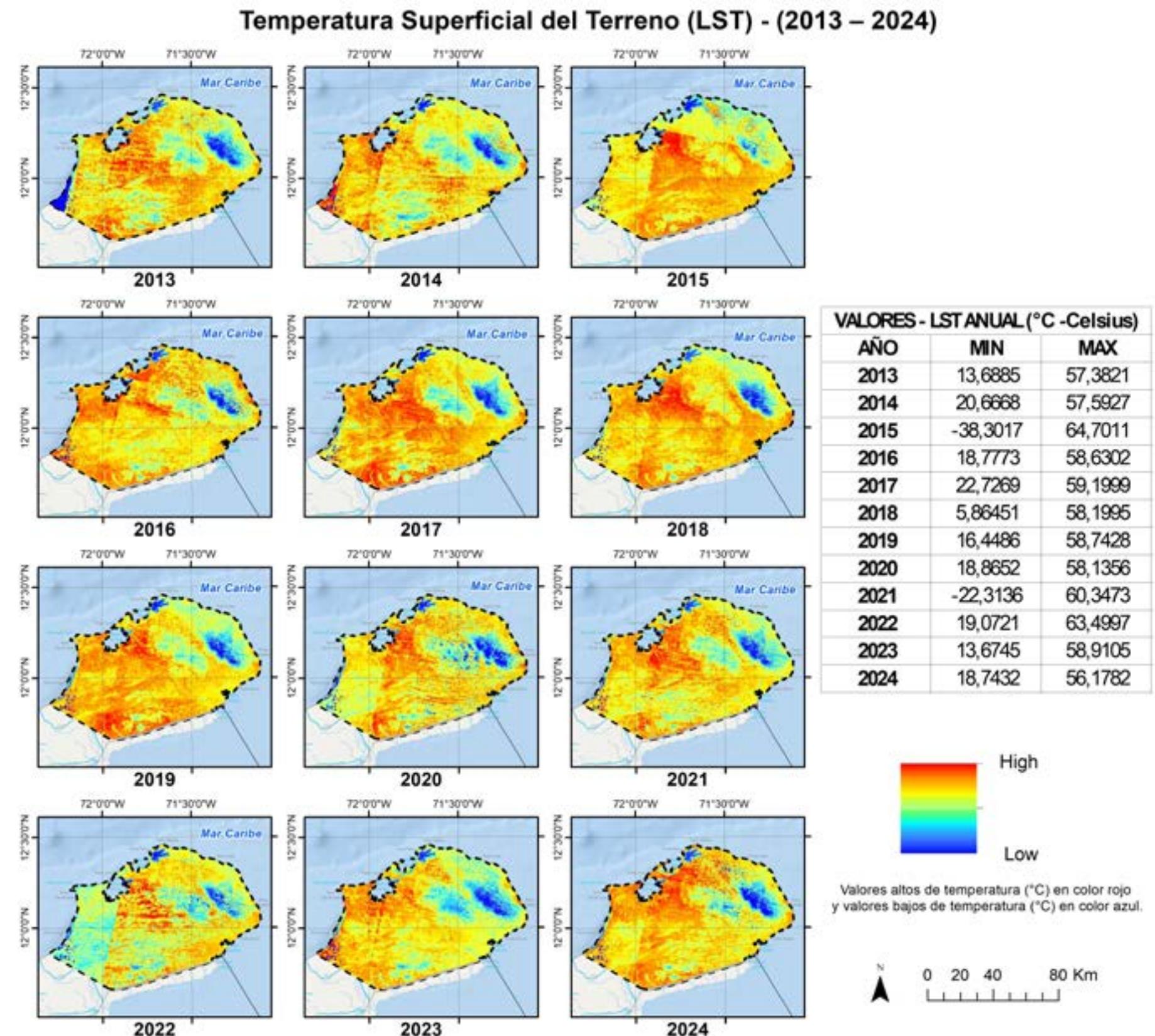


Figura 8.5 Promedio anual de la Temperatura Superficial Terrestre (LST) entre 2013 y 2024.

CAPÍTULO 8

Imágenes satelitales: Primer acercamiento a los círculos de hadas

Esta presencia considerada generalmente como "alteración mineral" para el ambiente cristalino, se localizan como era de esperarse en los cuerpos de roca al sur de la Falla de Cuisa con una respuesta importante de la Hornblenda. Los minerales ferromagnesianos tienen una respuesta clara a lo largo del Neis de Macuira y los esquistos de Jojoncito.

Los valores de crisotilo muestran una sensibilidad del sensor a los minerales silicatados transportados hacia zonas aledañas sedimentarias por corrientes y arroyos de comportamiento estacional y favorecidos por el control estructural presente.

La reversibilidad de la reacción de oxidación-reducción del hierro juega un papel importante en su comportamiento en los suelos. Bajo condiciones de anaerobiosis, los microorganismos pueden utilizar los óxidos de Fe^{3+} como aceptores finales de electrones para realizar la descomposición oxidativa de la materia orgánica, lo que da lugar a la reducción del Fe^{3+} a Fe^{2+} , que generalmente es más soluble y facilita la solubilidad de los óxidos.

La alteración de los suelos por presencia de microfugas de hidrógeno presentes en los círculos de hadas generan una alta

correspondencia de la presencia de los óxidos y de carbonatos de Fe asociados a dichas exudaciones; es el caso de la siderita ($FeCO_3$), de gran importancia en el análisis por ser un mineral secundario en el que la reacción del H2-roca generadora (cristalina)-roca huésped (calcárea) y un sello efectivo, condicionan favorablemente las probabilidades de generación-almacenamiento de hidrógeno natural.

El tránsito ferroso-férreo y minerales asociados se explica por la dispersión de los elementos más solubles hacia zonas más bajas sin expulsión al mar.

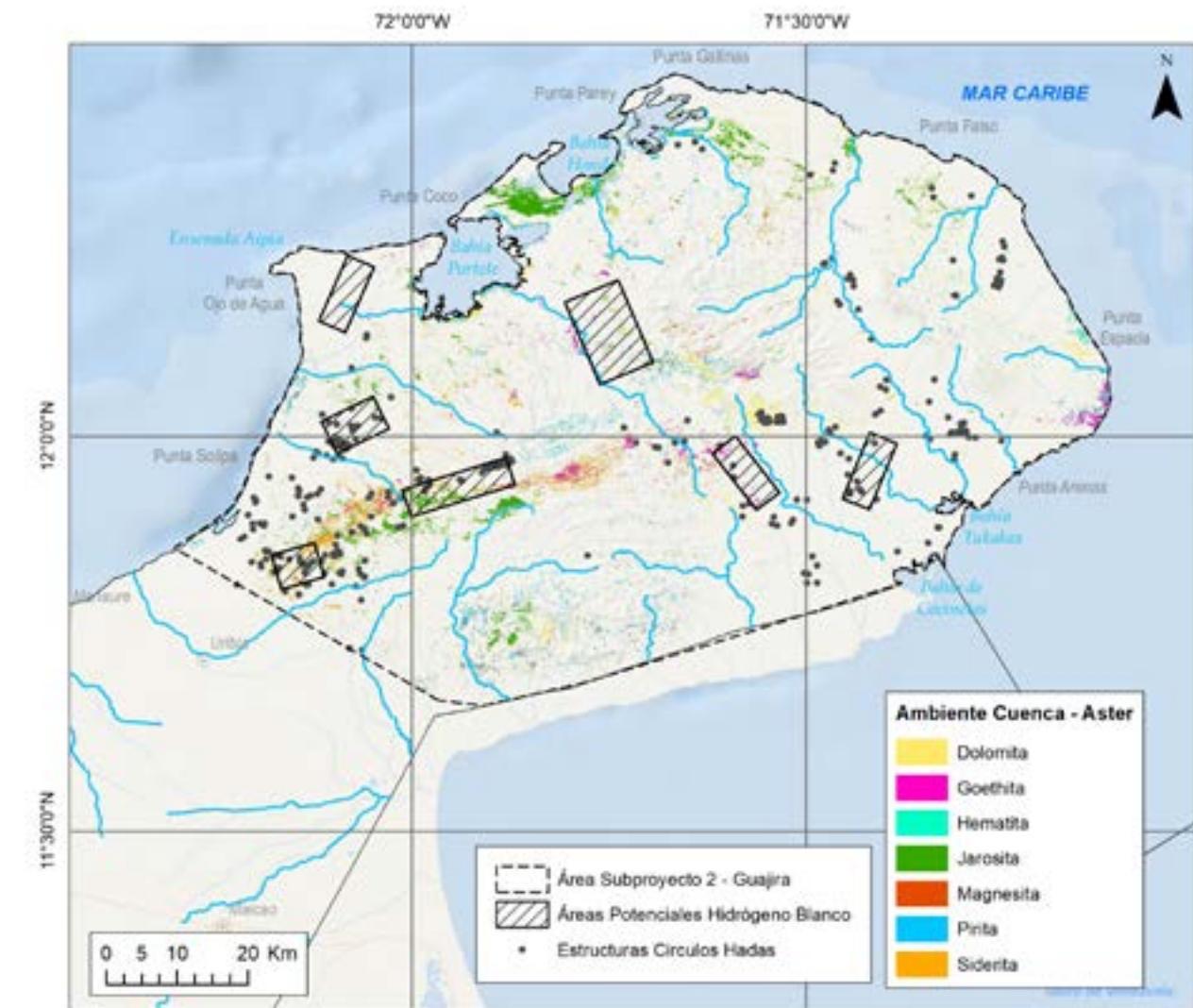
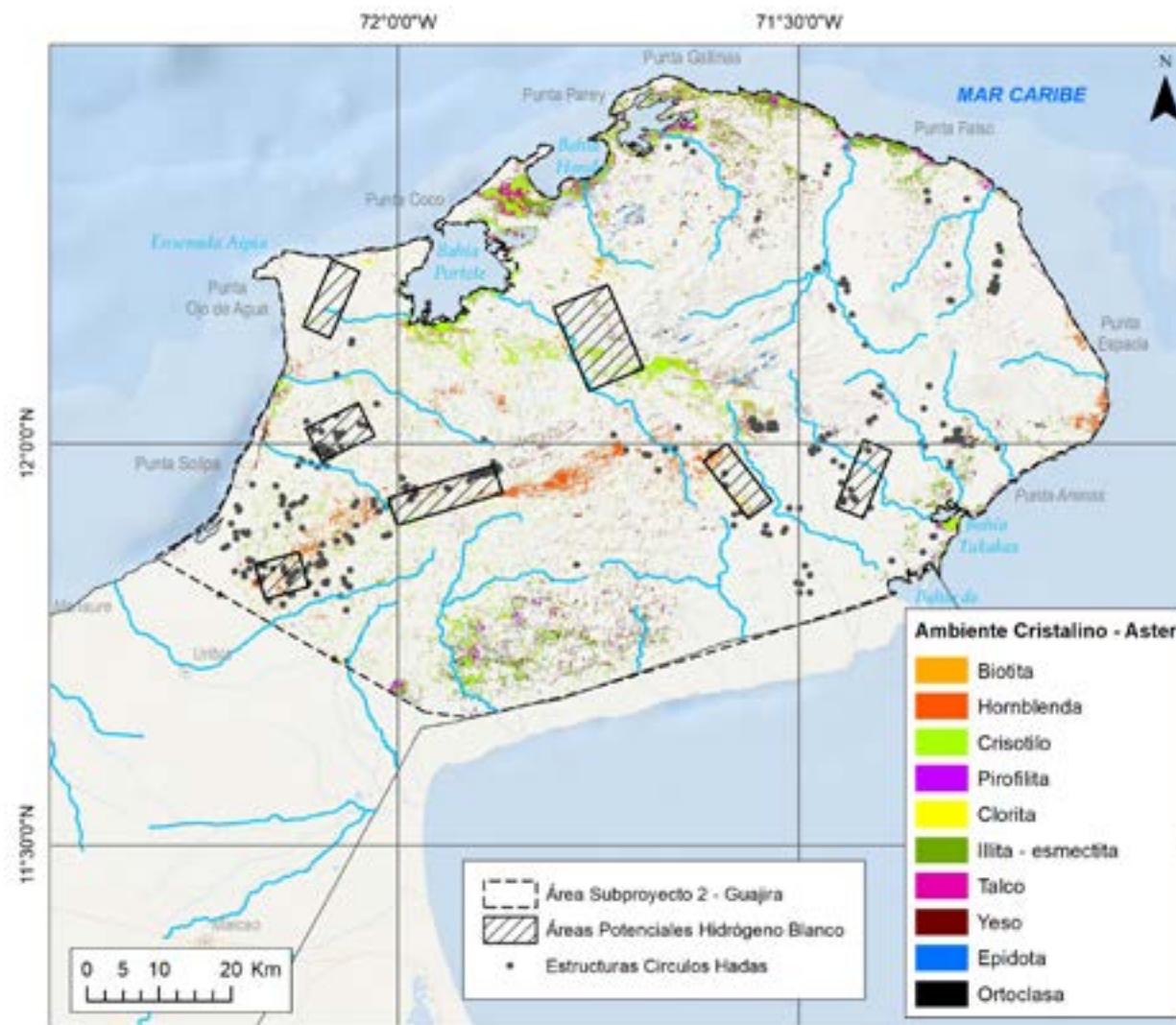


Figura 8.6 Análisis de los resultados de minerales primarios y de alteración en los ambientes cristalino (izquierda) y cuenca (derecha), en relación con las unidades geológicas aflorantes. Elaborado a partir de imágenes satelitales ASTER descargadas.

Análisis discriminante

El análisis discriminante es una técnica estadística empleada para clasificar un conjunto de observaciones en grupos predefinidos, se fundamenta en las características cuantitativas de dichas observaciones. Este análisis es especialmente útil cuando se dispone de una variable dependiente categórica y se pretende utilizar variables independientes continuas o categóricas para predecir a qué grupo pertenecerá una nueva observación.

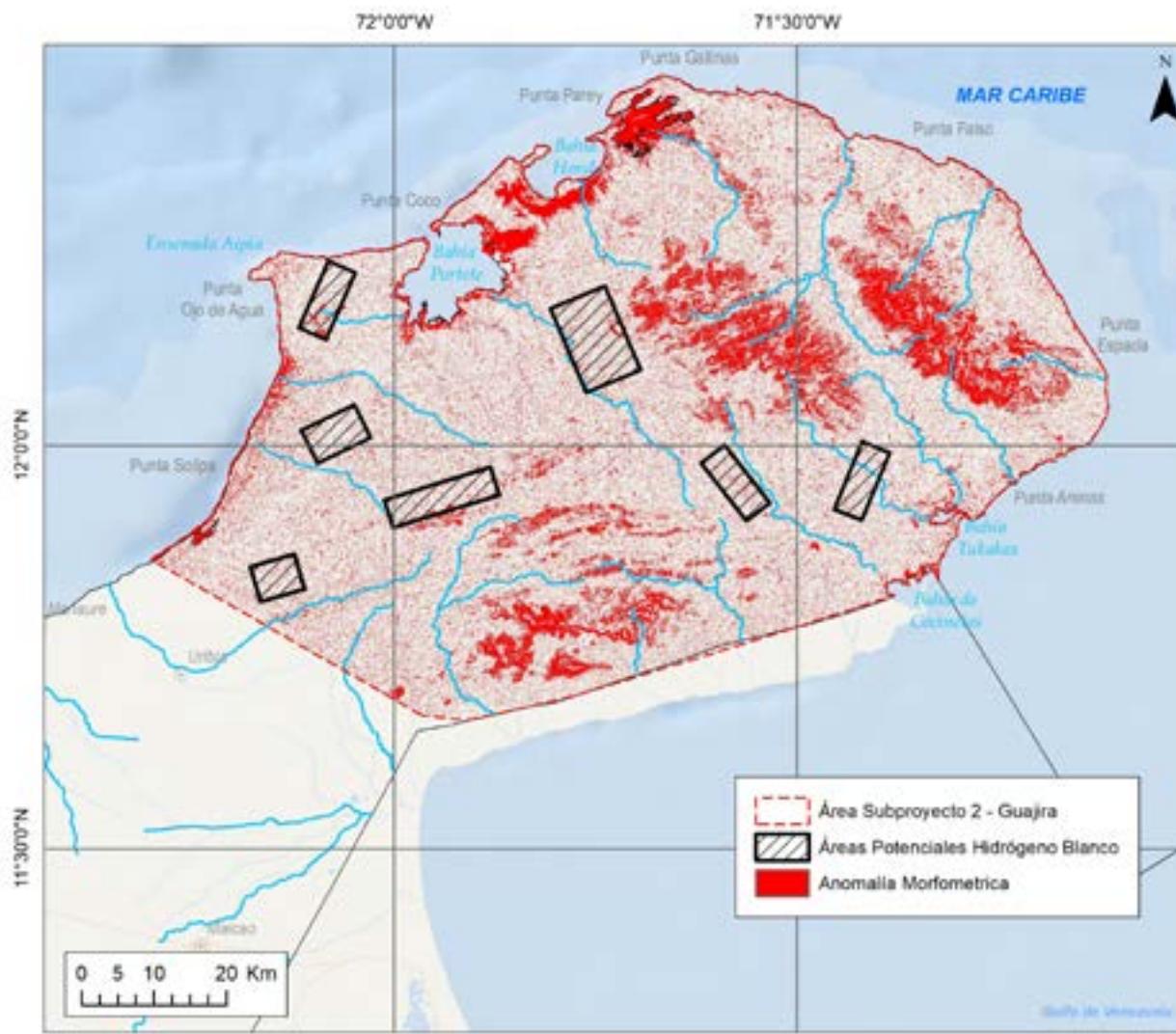


Figura 8.7 Anomalías morfométricas identificadas en el área de estudio.

Para la morfometría el método implementado busca identificar posibles círculos de hadas mediante el análisis de la morfometría del terreno en imágenes satelitales de la misión ALOS PALSAR. Se analizaron relaciones estadísticas entre variables independientes y la variable dependiente (agrupación de círculos de hadas). Este análisis permitió delimitar áreas con condiciones morfométricas favorables para la presencia de círculos de hadas, las cuales se cruzaron con zonas de trupillo para validar su condición geobotánica.

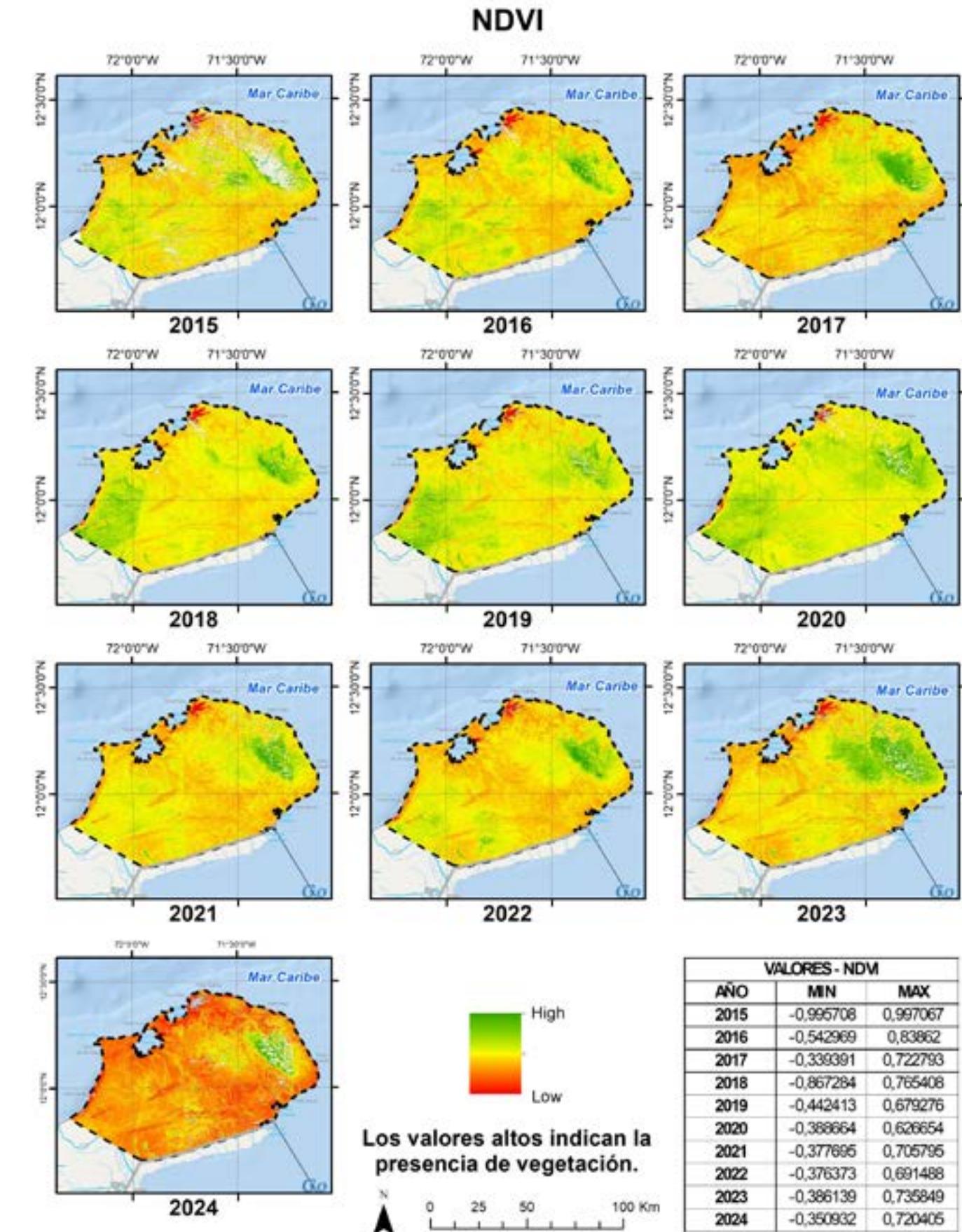


Figura 8.8 Distribución del índice de vegetación normalizada o NDVI en el área de estudio calculada para la temporalidad desde el 2015 al 2023 del satélite de Sentinel 2.

CAPÍTULO 8

Imágenes satelitales: Primer acercamiento a los círculos de hadas

Este mismo procedimiento fue implementado para la geobotánica utilizando imágenes satelitales del 2015 al 2024 de la misión Sentinel 2 para generar los índices NDVI, SAVI, GLI, EVI, ARVI, GNDVI y NBRI.

Se integraron imágenes satelitales en un mosaico multibanda, combinando bandas espectrales esenciales para calcular índices vegetales. Herramientas como Model Builder automatizaron los cálculos, precedidos por la aplicación de máscaras de nubes para eliminar interferencias y la reproyección de los rásteres al sistema CTM12. Aunque los índices vegetales ofrecen información clave sobre vegetación y condiciones ambientales, presentan correlaciones significativas que pueden

generar redundancia en el análisis. Para abordar esta limitación, se aplicó Análisis de Componentes Principales (PCA) a los índices, considerando datos desde 2015 hasta 2024. Este proceso identificó que los tres primeros componentes principales explicaban entre el 85% y el 95% de la varianza, mientras que los componentes adicionales aportaban variaciones mínimas. Posteriormente, se sintetizó la información multidimensional calculando la magnitud mediante la norma euclídea de los tres principales componentes.

El método permitió identificar áreas con condiciones favorables para la presencia de círculos de hadas utilizando índices vegetales derivados de imágenes satelitales Sentinel-2. Las

áreas identificadas, definidas mediante análisis discriminante, se cruzaron con zonas de trupillo para validar su condición geobotánica. Este enfoque integró anomalías morfométricas, índices geobotánicos y validaciones ecológicas, proporcionando un marco robusto para identificar estas formaciones naturales.

Lógica difusa

La lógica difusa es una disciplina matemática que utiliza expresiones que no son ni totalmente ciertas ni completamente falsas, es decir, es la lógica aplicada a conceptos que pueden tomar un valor cualquiera de veracidad dentro de un conjunto

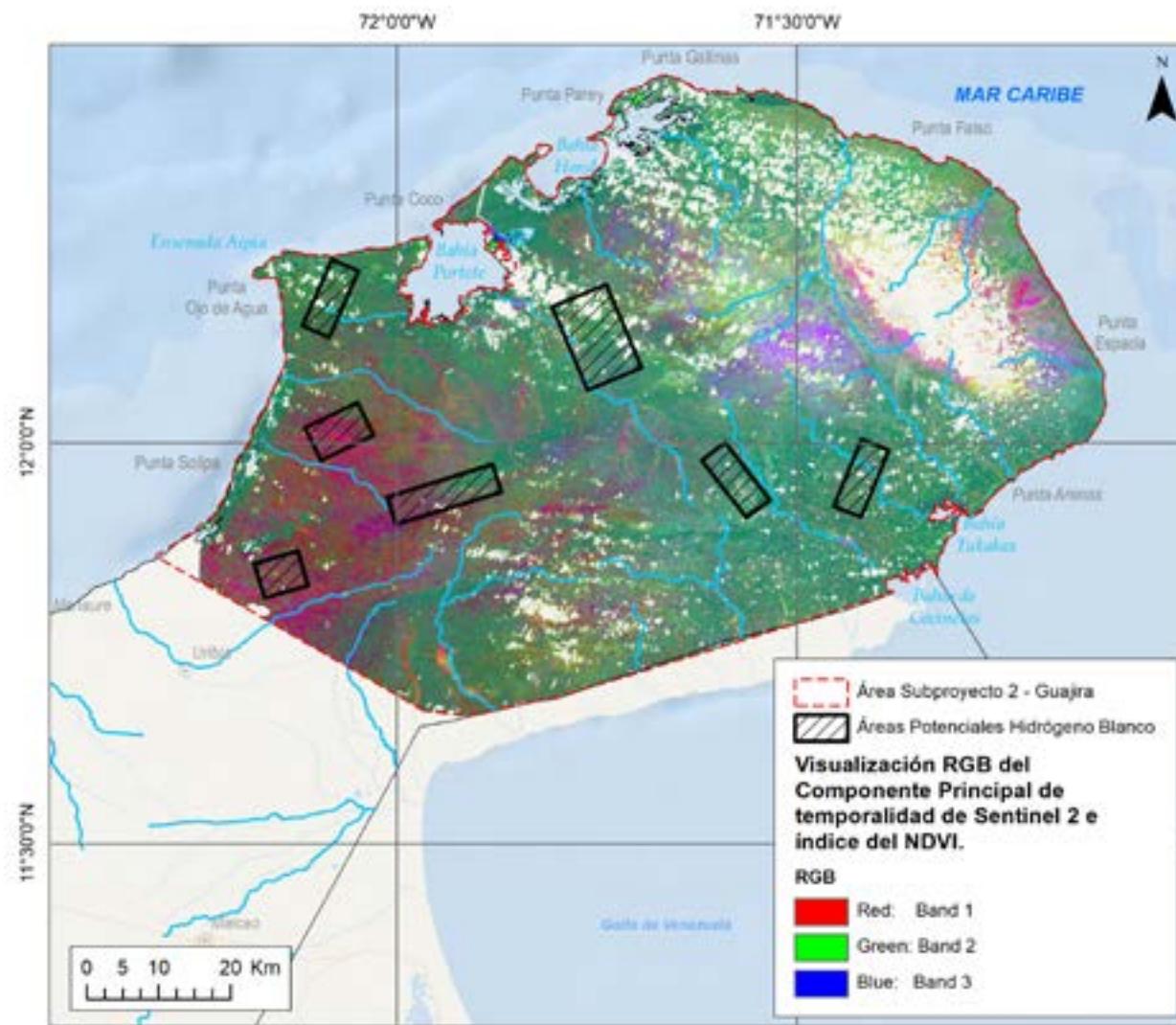


Figura 8.9 Análisis de Componentes Principales PCA obtenido para la temporalidad de Sentinel 2 e índice del NDVI.

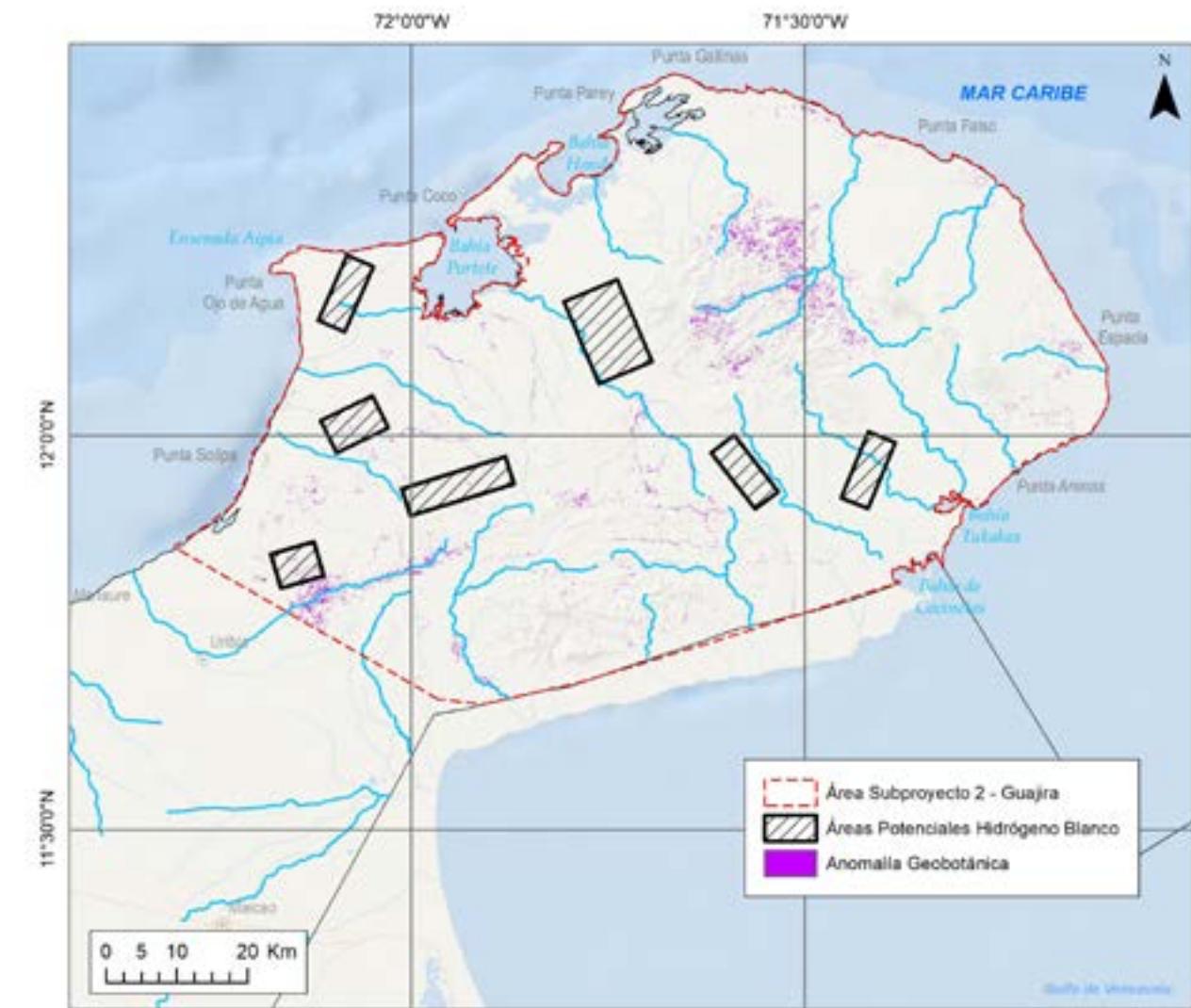


Figura 8.10 Anomalía geobotánica obtenida utilizando el satélite de Sentinel 2.

de valores que oscilan entre dos extremos de absoluta verdad y falsedad total.

Se escogieron cuatro entradas de análisis difuso Trupillo (*Prosopis juliflora*) y suelos blanqueados para geobotánica y para alteraciones minerales, la siderita y la hornblenda. Para la vegetación se determinó una alta correlación entre las zonas con círculos de hadas delimitados visualmente y las áreas definidas con la firma espectral. Esta especie presenta una fisionomía influenciada tanto por exposición climática, geoquímica de los suelos y condiciones de pH y EH, como por procesos de anoxia radicular y readaptación a condiciones de alteración por hidrógeno, representada en su ausencia en el centro de las estructuras evaluadas.

En los suelos, el pH determina el grado de adsorción de iones hidrógenos por las partículas del suelo, indicando acidez o alcalinidad. El pH es el principal indicador de la disponibilidad de nutrientes para las plantas, influyendo en la solubilidad, movilidad y disponibilidad de otros constituyentes y contaminantes inorgánicos presentes en el suelo.

Las alteraciones minerales detectadas indican presencia de siderita como mineral secundario con gran importancia en este trabajo, por las implicaciones formacionales y su presencia en las exudaciones de hidrógeno en los círculos de hadas; correlacionable con microfiltraciones de CH₄.

El metamorfismo regional y la presencia de milonitización son los factores principales de la asociación de hornblenda con el resultado de clasificación obtenido. La detección de minerales ferromagnesianos en sedimentos se puede explicar por transportes de poca longitud desde las áreas cristalinas hacia el oeste principalmente.

Existe una clara asociación entre los resultados obtenidos del análisis de minerales en general con contenido de hierro tanto ferroso como férrico, silicatos y carbonatos, lo que indica que existe indicios de metasomatismo alcalino localizado, en el que los productos de alteración de las rocas cristalinas se presentan en el área.

Machine Learning Landsat 8 + Sentinel 2

Los algoritmos de aprendizaje automático han ganado relevancia como herramientas capaces de identificar patrones en problemas complejos o con gran cantidad de variables. Comprender el funcionamiento de estos

algoritmos permite evaluar la importancia de las variables de entrada. En este caso, se emplearon algoritmos como la regresión logística, bosques aleatorios de clasificación y redes neuronales de clasificación.

Para las áreas de entrenamiento, se tomó como referencia el estudio de McMahon et al. (2023), del cual se seleccionaron cinco

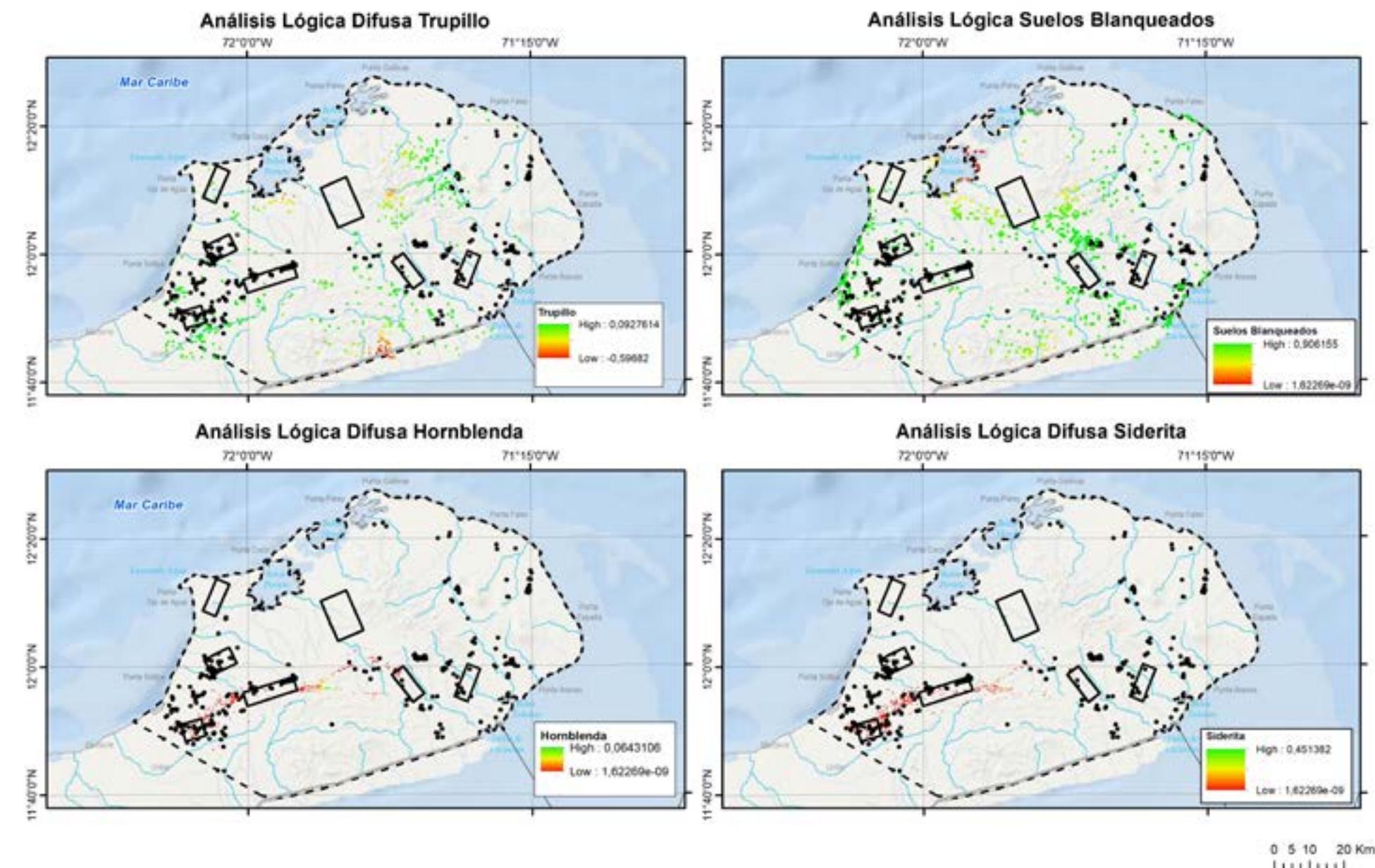


Figura 8.11 Geología regional del área de estudio a escala 1:100.000, con áreas priorizadas. Compilación basada en las Planchas 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10 y 10B del Servicio Geológico Colombiano (Zuluaga et al., 2008a, 2008b, 2008c, 2008d, 2008e, 2008f, 2008g, INGEOMINAS y Alama Mater GPR Lta, 2009).

zonas con presencia de círculos de hadas. Utilizando datos del satélite Landsat 8, se generaron un total de cuatro modelos en dos fases: en la primera, se consideraron únicamente las bandas espectrales del satélite, mientras que en la segunda se incluyeron 20 índices espectrales calculados a partir de dichas bandas. La votación de los modelos evaluados en la zona de estudio destacó áreas como la Serranía del Jarara y Macuira al oeste. En el mismo sector occidental, donde se han identificado altos valores magnéticos y gravimétricos, sobresalen las zonas cercanas a las fallas de Kasipoch, Puralape y Cuisa.

Con base en los resultados de las dos fases previas utilizando Landsat 8, se concluye que la inclusión de índices espectrales

mejora significativamente el rendimiento de los modelos. Por ello, considerando la mayor resolución espacial del satélite Sentinel-2, con un tamaño de píxel de 10 metros, se calcularon los 20 índices iniciales y se añadieron 16 índices adicionales, sumando un total de 36 índices espectrales.

Mientras que para Landsat 8 las predicciones se realizaron a partir de una única escena, en el caso de Sentinel-2 fue necesario trabajar con dos escenas, procesadas de manera independiente. Entre las nuevas variables de entrada se incluyó la pendiente, una característica que, según la literatura, es relevante para la identificación de círculos de hadas. Esta importancia fue confirmada por el modelo de Bosques Aleatorios de Clasificación,

que destacó la pendiente como una de las principales variables para determinar si un píxel pertenece o no a un círculo de hadas. Se entrenaron únicamente cuatro modelos, obteniendo resultados comparables a los de Landsat 8. Estos resultados nuevamente subrayan la relevancia de áreas como la Serranía del Jarara, la Macuira y las fallas Kasipoch, Puralape y Cuisa.

Para la votación Machine Learning Landsat 8 + Sentinel 2, se entrenaron 12 modelos en total. Al aplicar la votación sobre las áreas de interés, se verificó la consistencia de las zonas previamente identificadas con el potencial magnético y gravimétrico en el sector occidental del área de estudio. Los algoritmos utilizados permiten evaluar los pesos o la importancia de las

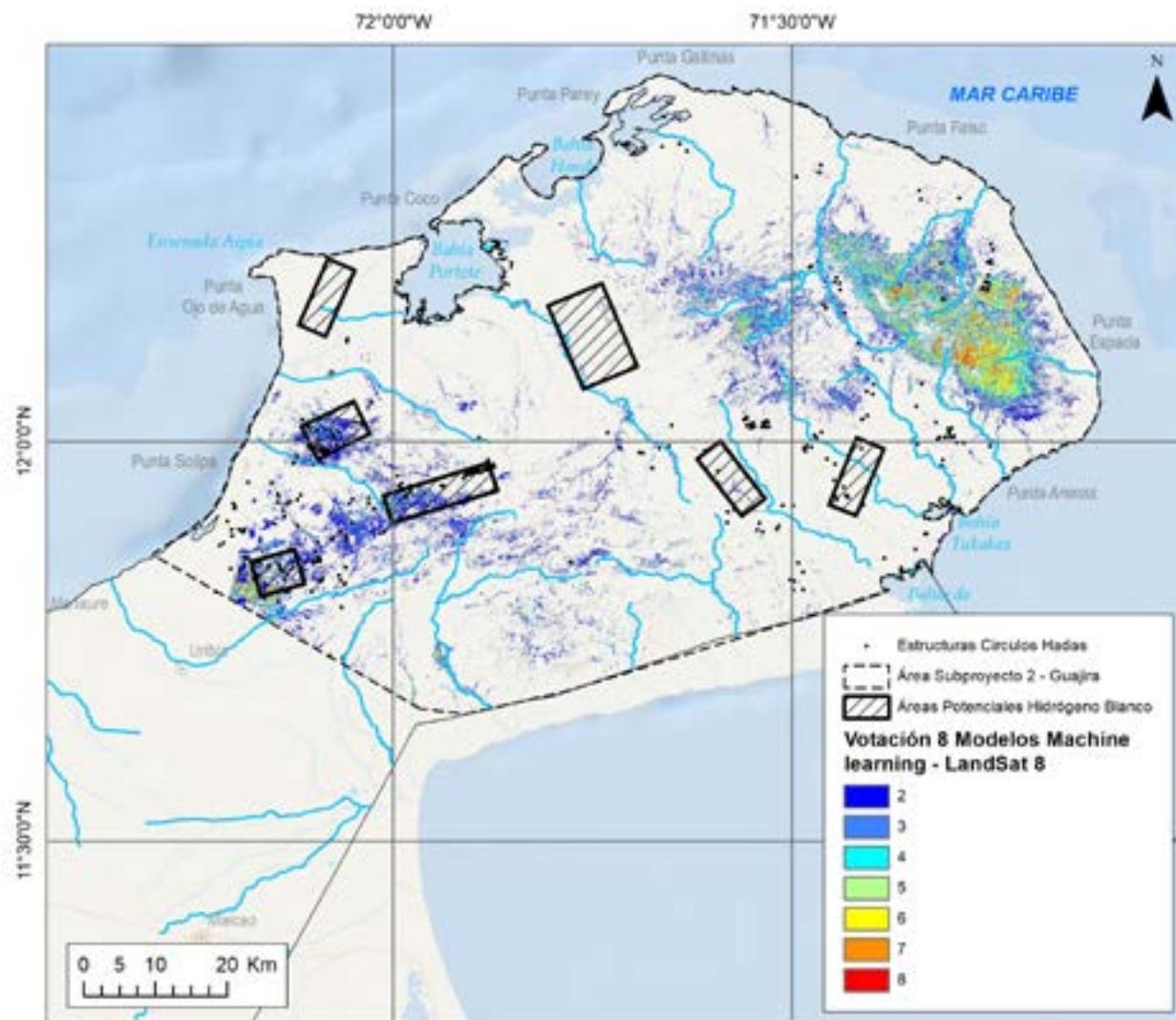


Figura 8.12 Mapa de votación de los ocho modelos de machine learning generados con Landsat 8 para la identificación de si un píxel puede corresponder o no a un FC. Los puntos negros corresponden a los posibles círculos de hadas identificados de manera visual.

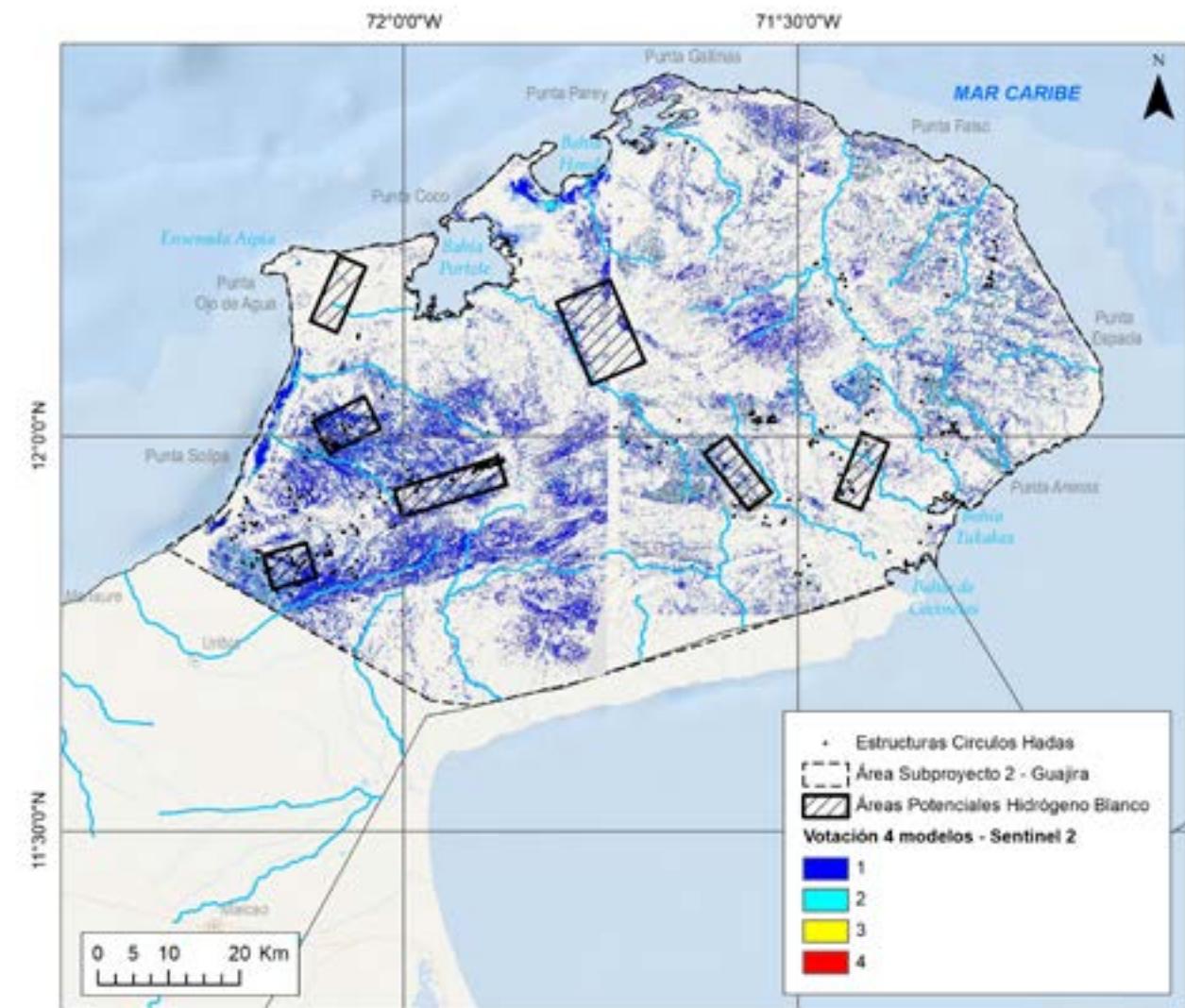


Figura 8.13 Mapa de votación de los cuatro modelos de machine learning generados con Sentinel 2 para la identificación de si un píxel puede corresponder o no a un FC. Los puntos negros corresponden a los posibles círculos de hadas identificados de manera visual.

variables de entrada, lo que facilita identificar cuáles índices tienen mayor relevancia en la toma de decisiones. De los 20 índices en común entre los datos de ambos satélites, se concluye que los 10 índices más importantes son los siguientes:

1. CVI (Chlorophyll Vegetation Index)
 2. EVI (Enhanced Vegetation Index)
 3. Alteration Rock
 4. Ratio Eisenhydroxid
 5. Ratio Iron Oxide

6. Ferrous Iron
7. Ferric Iron Fe^{3+}
8. SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)
9. NDSI (Normalized Difference Salinity Index)
10. Ferrous Silicates

Considerando la disponibilidad de imágenes de Landsat 8, se realizaron visualizaciones de los valores promedio y las desviaciones estándar para toda la temporalidad de los 10

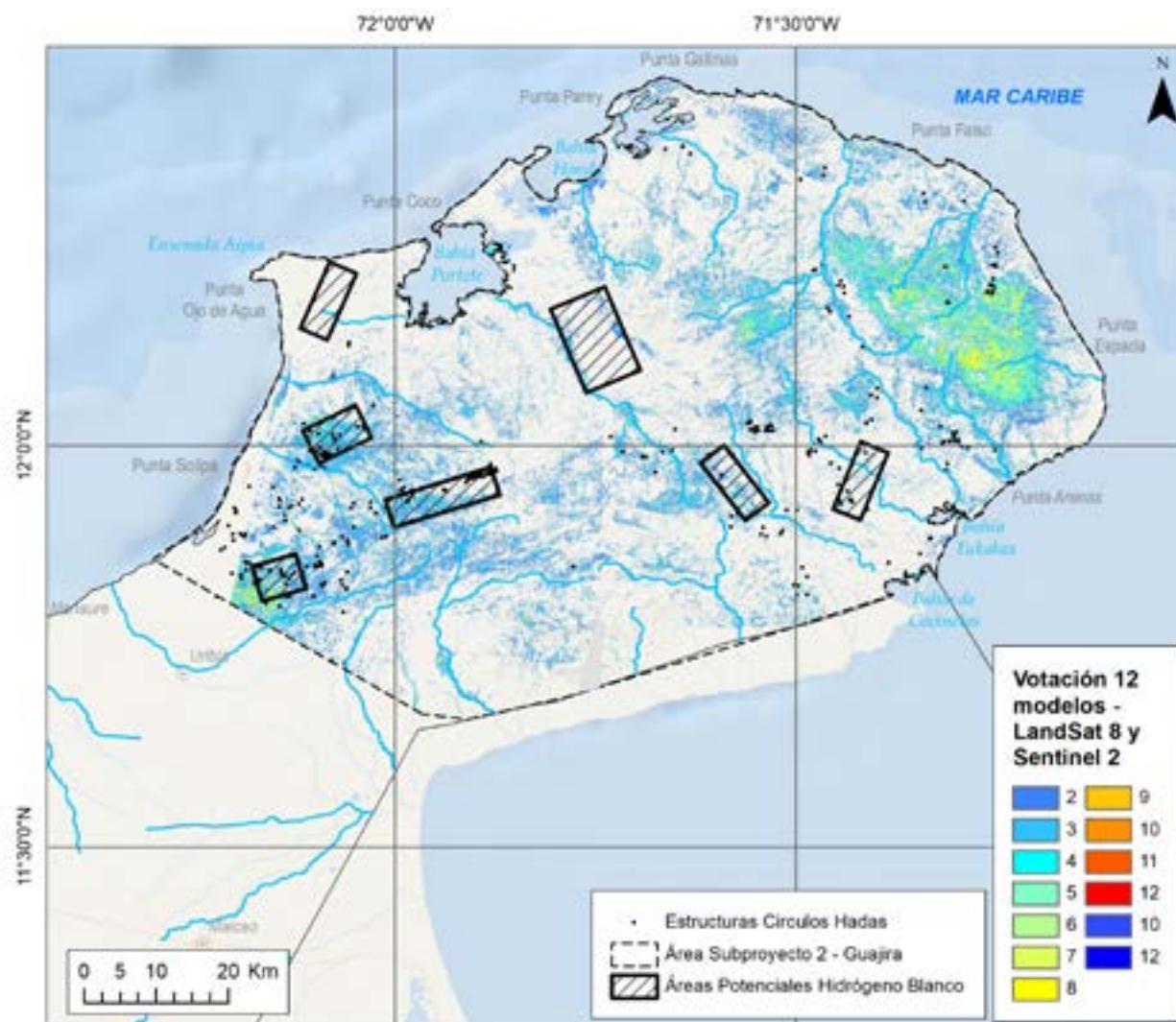


Figura 8.14 Mapa de votación de los 12 modelos de machine learning generados con Landsat 8 y Sentinel 2 para la identificación de si un píxel puede corresponder o no a un FC. Los puntos negros corresponden a los posibles círculos de hadas identificados de manera visual.

índices espectrales analizados. Adicionalmente, se incluyó el cálculo del NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), uno de los más citados en la literatura. Estos índices permiten analizar la vegetación, la composición del suelo y las características mineralógicas del área de estudio. Al evaluar las bandas de Landsat 8 necesarias para calcular los 10 índices priorizados por los modelos de Machine Learning, se observó que 7 índices utilizan la Banda 4, 5 emplean la Banda 7 y 4 hacen uso de la Banda 5. Esto destaca la relevancia de estas bandas en la clasificación de un píxel como potencialmente asociado a estructuras de círculos de hadas.

Los valores de desviación estándar de los índices espectrales muestran que las zonas con mayor variación se localizan en la Serranía del Jarara y la Serranía de la Macuira, así como en áreas próximas a las fallas de Puralapa y Simarúa. Estas altas variaciones temporales se atribuyen a la presencia de vegetación en estas regiones, cuya salud y cobertura fluctúan debido a los cambios climáticos, dejando expuesto el terreno en mayor o menor medida. Por otro lado, las áreas con bajas desviaciones estándar, que reflejan poca variación temporal en los índices, corresponden a zonas con escasa o nula cobertura vegetal, donde las rocas o suelos permanecen constantemente expuestas en la superficie.

Índice	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B10
NDVI				X	X			
CVI			X	X	X			
EVI		X		X	X			
Alteration Rock						X	X	
Ratio Eisenhydroxid				X				X
Ratio Iron Oxide	X			X				
Ferrous Iron			X	X	X			X
Ferric Iron Fe^{3+}			X	X				
SAVI				X	X			
NDSI						X	X	
Ferrous Silicates						X	X	
Condeo 10 indices	1	1	3	7	4	3	5	0

Tabla 8.1 Bandas del satélite Landsat 8 necesarias para el cálculo de los 10 índices priorizados por los modelos de Machine Learning. Se incluye el NDVI, ampliamente utilizado en la literatura.

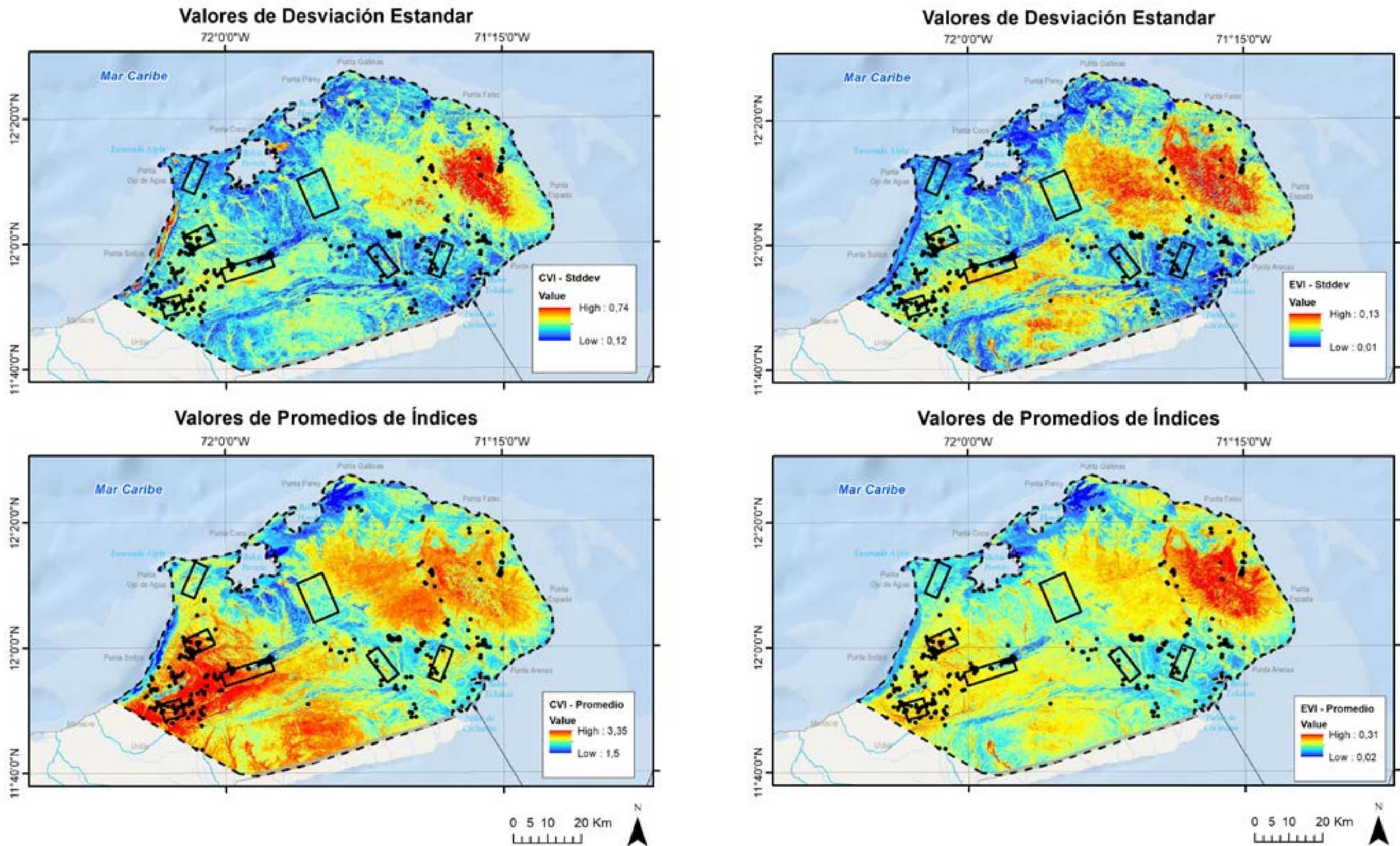


Figura 8.15 Valores promedio y desviaciones estándar calculados para toda la temporalidad del satélite de Landsat 8 y los índices de CVI (izquierda) y EVI (derecha).

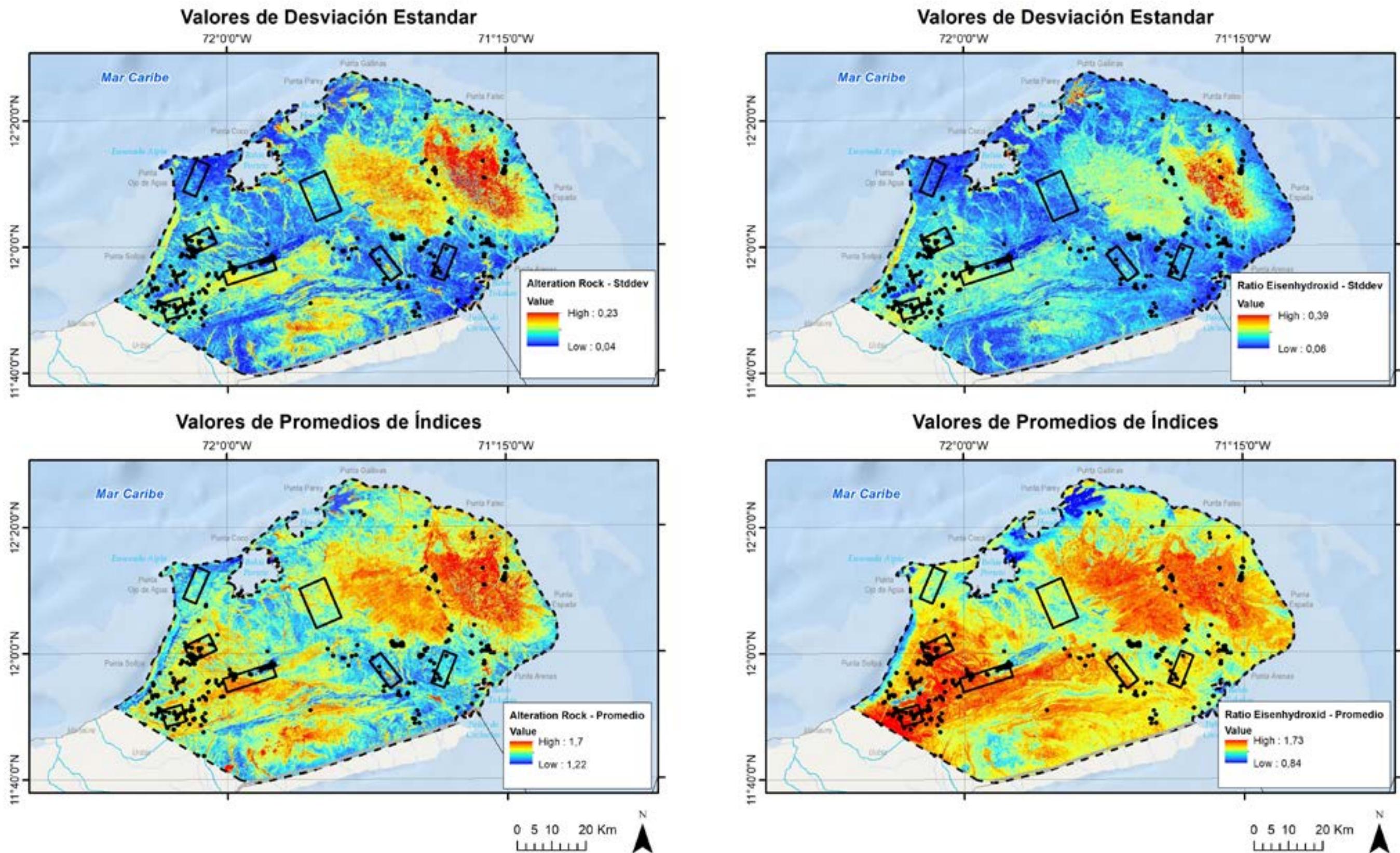


Figura 8.16 Valores promedio y desviaciones estándar calculados para toda la temporalidad del satélite de Landsat 8 y los índices de Alteration Rock (izquierda) y Ratio Eisenhydroxid (derecha).

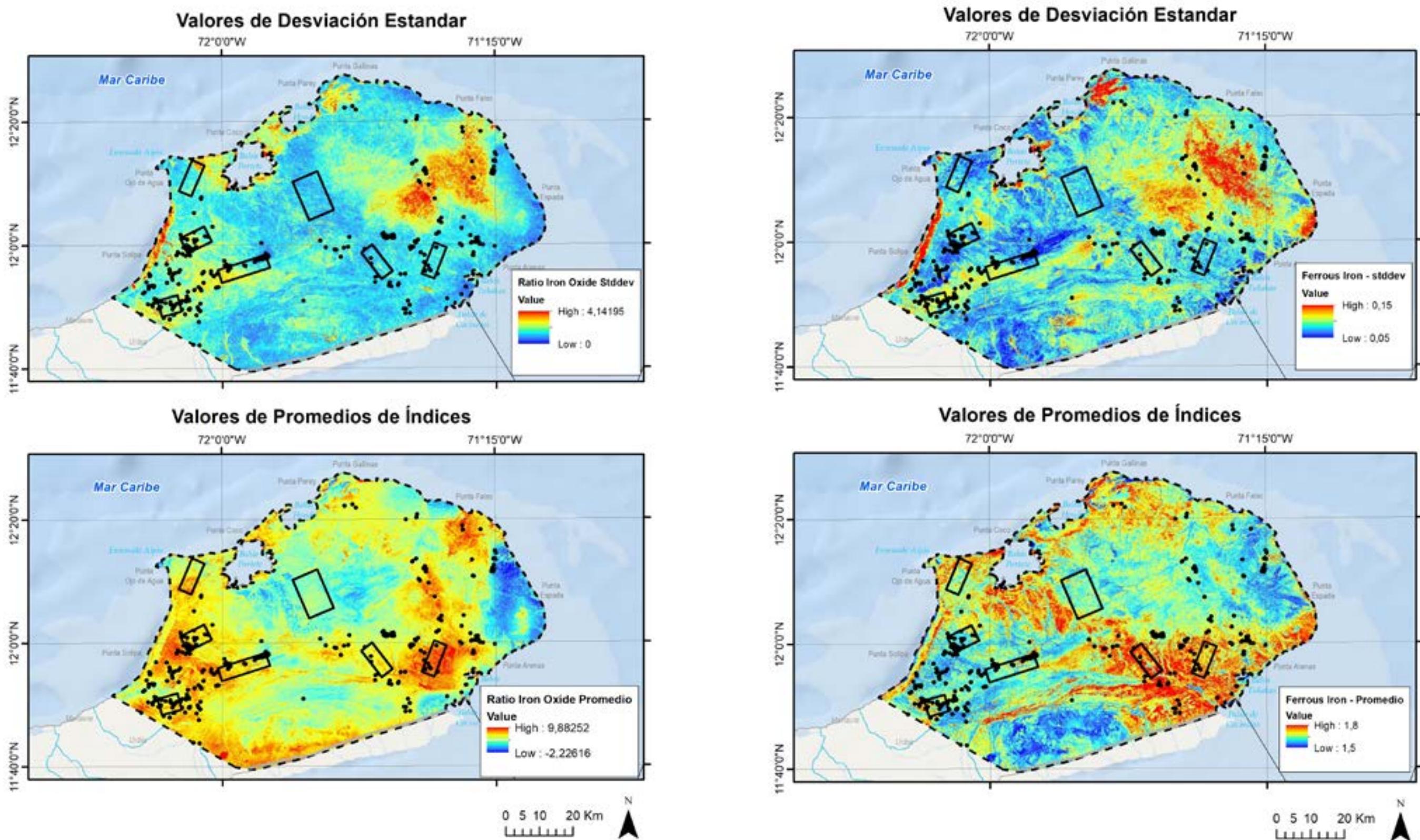


Figura 8.17 Valores promedio y desviaciones estándar calculados para toda la temporalidad del satélite de Landsat 8 y los índices de Ratio Iron Oxide (izquierda) y Ferrous Iron (derecha).

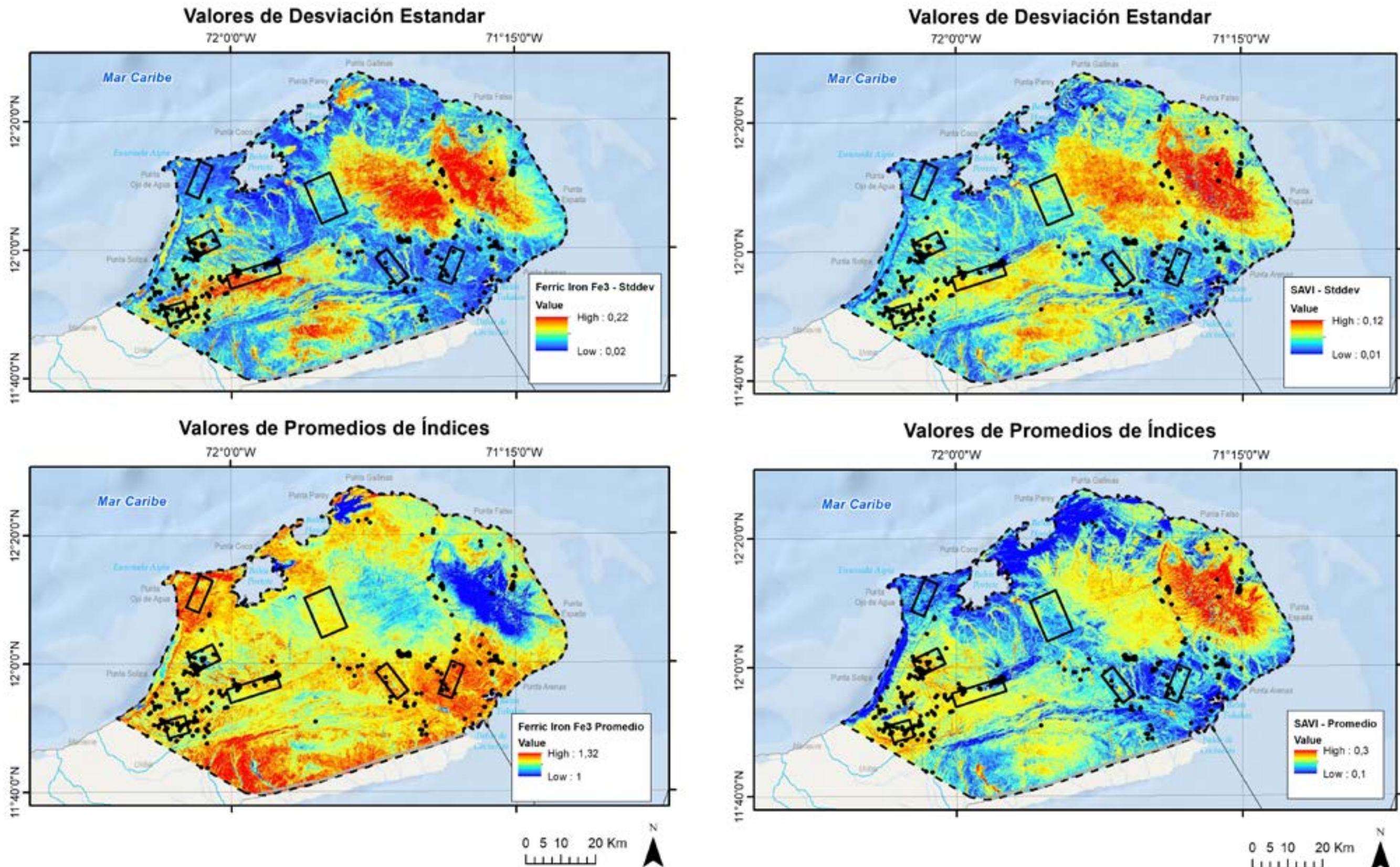


Figura 8.18 Valores promedio y desviaciones estándar calculados para toda la temporalidad del satélite de Landsat 8 y los índices de Ferric Iron Fe³⁺ (izquierda) y SAVI (derecha)

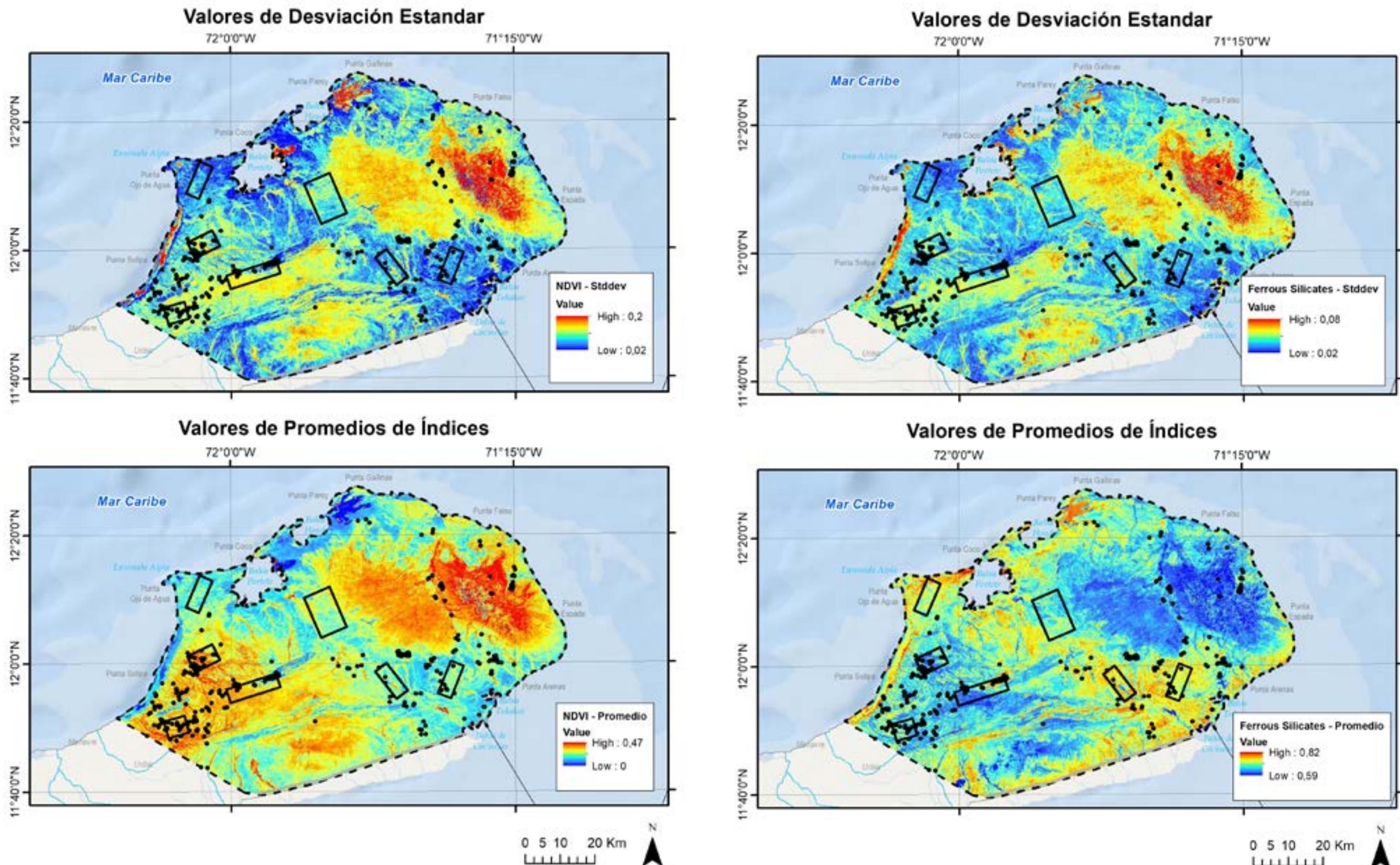


Figura 8.19 Valores promedio y desviaciones estándar calculados para toda la temporalidad del satélite de Landsat 8 y los índices de NDVI (izquierda) y Ferrous Silicates (derecha).



Fotografía: Jair Ramírez Cadena

CAPÍTULO 9

El porqué de los siete (7) polígonos

Para el análisis integrado mediante ponderación, cuyo objetivo es identificar las zonas con mayor potencial para la presencia de hidrógeno natural en la Alta Guajira, se consideraron 16 capas de información.

Las variables seleccionadas se definieron a partir de los resultados obtenidos en el cálculo de variables temáticas, la revisión bibliográfica, y el criterio experto de los profesionales para cada metodología implementada. Las variables integradas corresponden a:

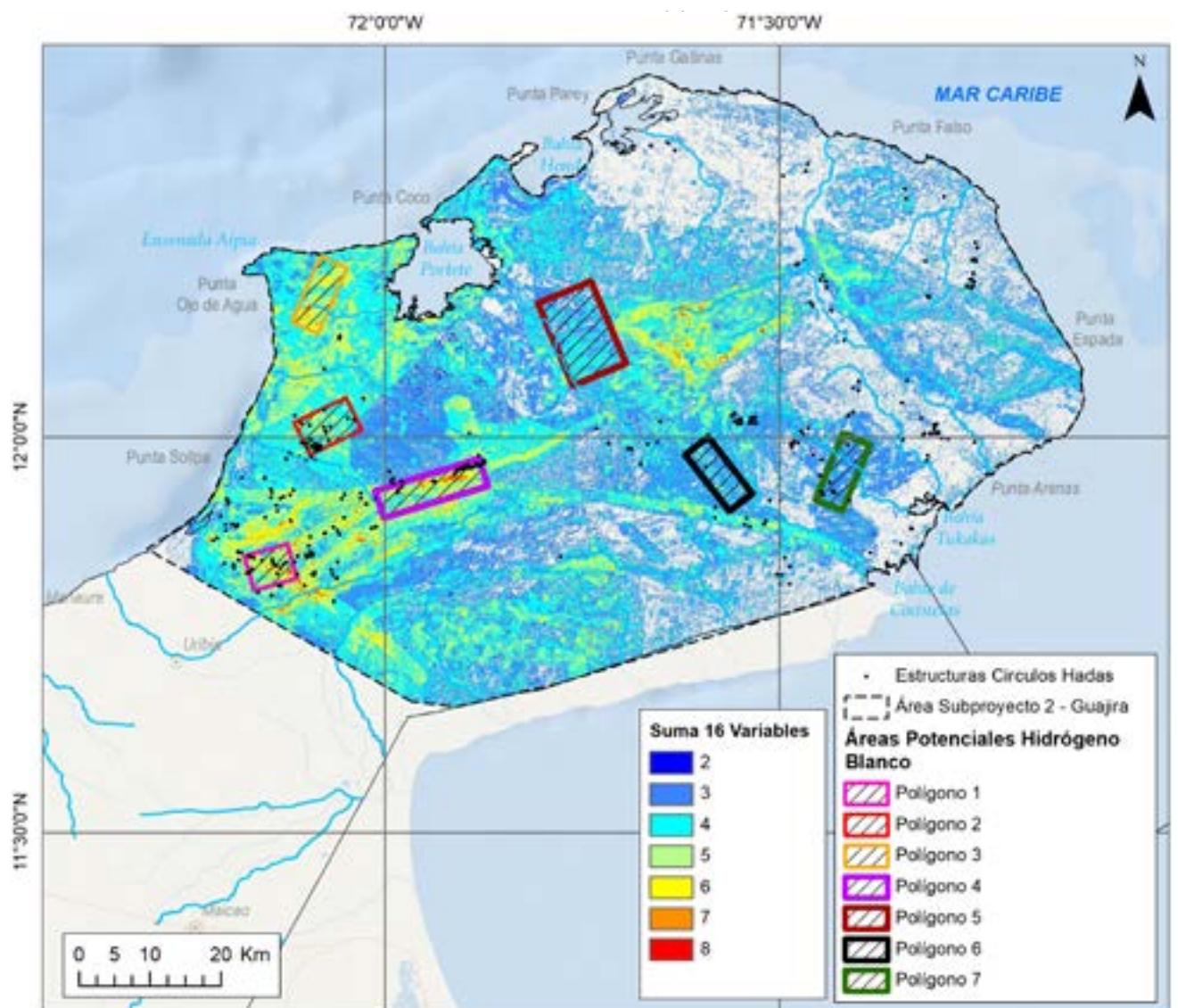


Figura 9.1 Mapa obtenido a partir de la suma de las 16 capas de entrada en el álgebra de mapas, utilizado para la identificación de 7 áreas de interés común entre las variables.

1. Rocas de interés
 2. Fallas regionales
 3. Densidad de fracturamiento
 4. Morfometría
 5. Anomalía magnética
 6. Anomalía gravimétrica
 7. Algoritmo MTMF curvas espectrales
FC en el mundo
 8. Análisis discriminante geobotánica
 9. Presencia de Trupillo
 10. Suelos blanqueados
 12. Siderita
 13. Hornblenda
 14. Alteraciones
 15. Random forest ArcGis
 16. Modelos de Machine Learning Landsat
8 + Sentinel 2

Estos polígonos abarcan una superficie total de 350 km², seleccionada especialmente para el estudio de los círculos de hadas, basándose en las características geológicas, geobotánicas y minerales que sugieren condiciones favorables para su formación y posible influencia de fallas regionales.

Polígono 1: Con anomalías magnéticas y gravimétricas destacadas, el Polígono 1 presenta una gran potencialidad geológica, especialmente en el sector sur, donde los modelos de Machine Learning indican áreas de alto interés. Su topografía y humedad favorecen la acumulación de gases, convirtiéndolo en una zona clave para el estudio de hidrógeno blanco y círculos de hadas.

Polígono 2: El Polígono 2 sobresale por su alta anomalía gravimétrica y su excelente morfología para la acumulación de fluidos y gases. El modelo de Machine Learning identifica áreas de gran interés, especialmente en el noroeste, lo que lo posiciona como un sitio prometedor para la investigación de reservorios de hidrógeno blanco.

Polígono 3: Con una anomalía magnética positiva, el Polígono 3 destaca por su geología rica en cuarcitas y serpentinitas, indicativas de una alta concentración de minerales. Aunque las votaciones de Machine Learning son menores, la zona tiene un gran potencial para la generación de hidrógeno, lo que la convierte en un área relevante para estudios de emanaciones de gases.

Polígono 4: El Polígono 4 se caracteriza por fallas importantes y anomalías magnéticas y gravimétricas que lo hacen ideal para la formación de círculos de hadas. Su geología, combinada con altos índices de humedad, lo convierte en un excelente candidato para la acumulación de hidrógeno blanco y otras investigaciones geofísicas.

Polígono 5: Aunque la zona central muestra menor interés, el Polígono 5 resalta por sus anomalías magnéticas y la presencia de drenajes en los perímetros. Su topografía plana y húmeda, junto con su geología sedimentaria, lo convierte en un sitio clave para la explotación de estructuras de hidrógeno blanco y acumulación de gases.

Polígono 6: Con anomalías magnéticas negativas y una baja anomalía gravimétrica, el Polígono 6 destaca por su geología adecuada para la acumulación de fluidos. A pesar de que los modelos de Machine Learning indican menor actividad, la zona tiene un alto potencial para el estudio de estructuras geológicas relacionadas con la emisión de gases y la producción de hidrógeno blanco.

Polígono 7: El Polígono 7, con anomalías magnéticas negativas, presenta condiciones geológicas que favorecen la formación de estructuras de emisión. Aunque la actividad en los modelos de Machine Learning es limitada, su ubicación y características geológicas lo hacen relevante para futuras investigaciones sobre hidrógeno blanco y gasificación.

De un total de 333 círculos de hadas identificados preliminarmente en el área de estudio, solo 87 se encuentran dentro de los polígonos de interés, representando el 26,13%. La distribución desigual de estos círculos entre los siete polígonos sugiere variaciones locales en los factores que favorecen su identificación en superficie, los cuales podrían estar

relacionados con indicios de una posible presencia de hidrógeno natural. La distribución en cada polígono es la siguiente:

- **Polígono 1:** Con un área de 30,042 km², se identificaron 16 círculos de hadas, cuya área total suma 89.611,60 m², lo que representa el 0,2983% del área del polígono.
- **Polígono 2:** Con un área de 40,054 km², se localizaron 28 círculos de hadas, con un área total de 128.716,17 m², equivalente al 0,3214% del área del polígono.
- **Polígono 3:** No se identificaron círculos de hadas en este polígono.
- **Polígono 4:** Con un área de 60,076 km², se hallaron 34 círculos de hadas, cuya área total es de 443.011,58 m², representando el 0,7374% del área del polígono.
- **Polígono 5:** No se identificaron círculos de hadas en este polígono.
- **Polígono 6:** Este polígono, con un área de 40,04 km², contiene 2 círculos de hadas, cuya área total es de 9.077,37 m², equivalente al 0,0226% del área del polígono.
- **Polígono 7:** Con un área de 40,035 km², se identificaron 7 círculos de hadas, con un área total de 50.538,49 m², representando el 0,1262% del área del polígono.

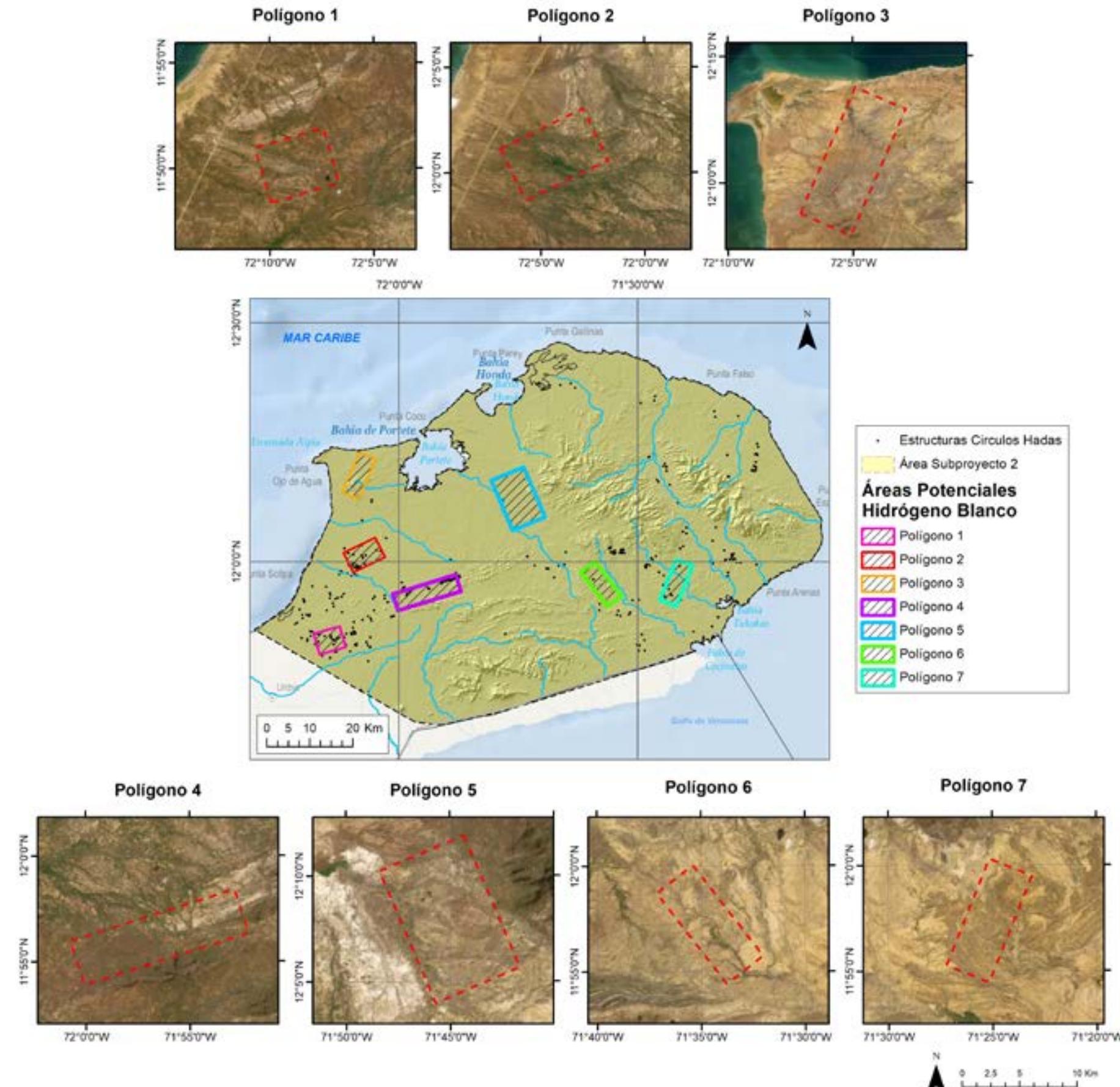


Figura 9.2 Acercamiento al terreno correspondiente a cada uno de los siete polígonos de interés seleccionados, considerando las 16 capas temáticas utilizadas para la priorización del levantamiento hiperespectral.

Círculo de hada	Coordinada X	Coordinada Y	Área [m ²]	Perímetro [m]	Radio Menor [m]	Radio Mayor [m]
1	AG-7c	5090083,374	2867568,236	348,311	50,817	58,659
	AG-3b	5090374,823	2867614,615	5195,296	259,153	36,208
	AG-4b	5090791,602	2867298,425	5773,463	280,505	36,971
	AG-6a	5090278,29	2865293,897	7594,306	331,383	38,844
	AG-8c	5090573,39	2865762,01	5297,685	286,908	33,005
	AG-5b	5091964,033	2866977,792	5708,957	271,222	37,711
	AG-8b	5093404,177	2867199,106	6374,076	293,132	38,989
	AG-6b	5093450,157	2866763,885	6157,287	292,225	39,842
	AG-7b	5093446,065	2866577,672	5736,134	287,457	35,434
	AG-7a	5093897,363	2866289,968	4739,637	254,162	35,199
	AG-8a	5093991,911	2866265,357	1967,545	184,512	14,825
	AG-13b	5094527,296	2865886,666	8329,164	344,68	42,062
	AG-10c	5094866,113	2866400,096	4570,421	252,649	32,26
	AG-11b	5095314,555	2866730,956	8448,853	338,567	46,434
	AG-11c	5094043,739	2865121,294	2442,595	202,496	22,843
	AG-14b	5094086,147	2865092,267	2035,975	171,824	20,339
2	AG-40b	5099330,348	2882354,502	11612,441	437,147	32,739
	AG-39b	5099347,436	2882581,329	10130,107	368,555	48,962
	AG-28c	5099507,656	2882946,516	589,213	88,151	12,3
	AG-67a	5099471,7	2882983,745	338,059	67,383	8,961
	AG-65a	5099786,252	2882950,742	2037,124	168,121	19,49
	AG-66a	5099963,781	2883024,425	3800,79	229,2	30,195
	AG-69a	5100022,027	2883112,195	2839,481	194,492	24,512
	AG-64a	5099733,631	2883110,691	5081,968	265,909	31,04
	AG-29c	5098896,683	2882946,637	3203,724	207,98	25,418
	AG-30c	5098817,391	2883137,584	4805,026	252,687	33,658
	AG-38b	5098226,11	2882820,771	12524,188	406,053	55,603
	AG-68a	5099277,598	2883433,537	2294,642	176,082	21,778
	AG-32c	5098290,891	2883511,195	467,484	78,82	10,197
	AG-71a	5097750,919	2883392,059	3014,903	198,324	28,916
	AG-33c	5098743,74	2883963,884	3087,126	201,674	27,751
	AG-43b	5098175,874	2884207,724	6876,26	303,282	39,562
	AG-72a	5101086,191	2883805,635	1135,492	121,485	17,141
	AG-66b	5100618,951	2885059,836	6792,978	302,653	38,221
	AG-65b	5100656,201	2885187,488	4730,038	248,708	34,057
	AG-62b	5100434,515	2885756,427	3954,476	227,334	30,517
	AG-38c	5101298,146	2885780,89	2767,322	194,99	23,683
	AG-74a	5098462,483	2885897,103	6373,306	294,129	36,288
	AG-75a	5098474,866	2885964,672	3597,102	226,964	25,055
	AG-76a	5097337,494	2886226,792	5442,857	273,785	34,17
	AG-77a	5097286,141	2886273,73	2096,818	167,748	21,94
	AG-64b	5100469,355	2888095,964	2208,687	168,624	25,036
	AG-68b	5104552,824	2886786,714	8061,135	327,002	44,823
	AG-67b	5103723,783	2886904,913	7766,924	321,012	41,924
						58,971

Tabla 9.1 Se presentan las coordenadas del centroide para cada uno de los círculos de hadas identificados en los Polígonos 1 y 2. Para cada círculo de hadas se calcularon el área y el perímetro correspondientes. El radio menor se determinó como la distancia más corta desde el centroide hasta el vértice.



Fotografía: Manuel Zafra.

Tabla 9.2 Se presentan las coordenadas del centroide para cada uno de los círculos de hadas identificados en el Polígono 4. Para cada círculo de hadas se calcularon el área y el perímetro correspondientes. El radio menor se determinó como la distancia más corta desde el centroide hasta el vértice más cercano, mientras que el radio mayor se estimó a partir del área y el radio menor. Coordenadas en EPSG:9377.

Polígono	Círculo de hada	Coordinada X	Coordinada Y	Área [m ²]	Perímetro [m]	Radio Menor [m]	Radio Mayor [m]
4	AG-25b	5110565,291	2876544,63	4590,158	255,455	27,603	52,932
	AG-24b	5110683,089	2876577,495	22109,874	543,26	73,71	95,479
	AG-26b	5110785,147	2876984,825	8223,339	327,532	48,061	54,463
	AG-26c	5111295,401	2877360,213	8639,056	345,554	46,333	59,351
	AG-23a	5111283,812	2878041,133	7217,906	324,363	40,513	56,711
	AG-29b	5115566,152	2878230,126	3553,443	223,572	28,969	39,045
	AG-28a	5115464,367	2878181,358	10409,808	417,717	42,876	77,282
	AG-27a	5115719,486	2878138,993	8921,637	343,96	48,809	58,183
	AG-29a	5115785,545	2878042,279	14809,202	445,688	58,85	80,101
	AG-31a	5118521,373	2879248,898	70222,375	1089,665	88,178	253,493
	AG-32a	5118704,783	2879504,556	7672,699	368,545	28,437	85,884
	AG-33a	5118834,305	2879809,891	34442,769	735,467	76,316	143,659
	AG-34a	5119140,634	2879816,929	5485,096	281,908	30,936	56,438
	AG-35a	5119081,892	2879893,969	20765,834	575,214	54,046	122,303
	AG-36a	5119361,635	2879814,286	65075,821	1100,561	97,497	212,461
	AG-37a	5119427,486	2880026,084	18027,815	505,495	67,142	85,467
	AG-38a	5119706,719	2879884,973	16070,194	548,959	44,156	115,846
	AG-39a	5119736,591	2880138,039	8256,956	346,009	37,754	69,616
	AG-39a	5119895,347	2880128,574	11249,297	483,722	36,072	99,267
	AG-44a	5120304,923	2880091,355	6822,181	323,622	38,044	57,08
	AG-43a	5120480,425	2880119,38	10390,127	418,359	37,672	87,791
	AG-46a	5120237,04	2880498,948	7887,675	348,618	32,974	76,143
	AG-45a	5120376,198	2880476,412	7891,215	330,512	43,421	57,849
	AG-41a	5120694,074	2880025,32	6797,792	303,337	39,948	54,166
	AG-42a	5121047,608	2880165,13	10948,362	405,1	48,135	72,4
	AG-47a	5121349,757	2880482,802	6695,802	311,752	34,638	61,532
	AG-48a	5121403,431	2880356,997	3551,485	221,718	28,058	40,291
	AG-53a	5121524,133	2880422,364	4303,887	250,439	30,041	45,603
	AG-49a	5121620,85	2880634,687	29150,934	630,741	82,755	112,127
	AG-51a	5121691,809	2880516,848	546,423	86,764	11,182	15,555
	AG-52a	5121681,75	2880483,435	420,815	81,984	7,553	17,735
	AG-37b	5121922,43	2880359,892	260,805	61,432	7,367	11,269
	AG-36b	5121953,756	2880323,563	1075,491	138,244	12,308	27,814
	AG-35b	5121997,022	2880357,782	1081,126	143,206	10,363	33,208



Fotografía: Manuel Zafra

Figura 9.3 En el área de la Alta Guajira, y considerando la importancia de la vegetación como indicador de los círculos de hadas y su posible relación con la presencia de hidrógeno natural, se ha identificado a la especie vegetal Trupillo (*Prosopis juliflora*) como un indicador clave.

Tabla 9.3 Se presentan las coordenadas del centroide para cada uno de los círculos de hadas identificados en los Polígonos 6 y 7. Para cada circulo de hadas se calcularon el área y el perímetro correspondientes. El radio menor se determinó como la distancia más corta desde el centroide hasta el vértice más cercano, mientras que el radio mayor se estimó a partir del área y el radio menor. Coordenadas en EPSG:9377.

Polígono	Círculo de hada	Coordinada X	Coordinada Y	Área [m ²]	Perímetro [m]	Radio Menor [m]	Radio Mayor [m]
6	AG-73c	5153301,116	2878753,276	6526,59	290,903	41,319	50,279
	AG-72c	5153202,471	2880378,182	2560,035	180,94	26,645	30,583
7	AG-101c	5171039,744	2876752,685	13613,494	418,704	60,669	71,425
	AG-99c	5170795,428	2877096,417	3075,734	200,262	28,442	34,422
	AG-100c	5170692,921	2877074,392	2808,585	190,155	27,726	32,244
	AG-75c	5169427,241	2876521,049	7038,082	300,441	44,609	50,221
	AG-94b	5169214,293	2876950,447	14345,134	430,258	62,865	72,635
	AG-102c	5170356,914	2878229,518	1236,803	126,167	19,052	20,664
	AG-82c	5172749,198	2883584,358	8465,169	333,598	42,641	63,191



CAPÍTULO 10

PlanetScope Exploración,
Precisión y Confiabilidad en Alta
Resolución

PlanetScope Exploración, Precisión y Confiabilidad en Alta Resolución

El sistema de satélites PlanetScope, operado por Planet Labs, proporciona imágenes de alta resolución con cobertura casi diaria y la capacidad de capturar cambios en la superficie terrestre en tiempo real. Para el área de estudio (figura 10.1), se utilizaron 22 escenas procesadas a Nivel 2A, distribuidas en tres períodos:

- Temporalidad 1: Enero - mayo de 2022.
 - Temporalidad 2: Agosto - diciembre de 2022
 - Temporalidad 3: Enero - mayo de 2023.

Al igual que en otros satélites, el cálculo de índices espectrales es una herramienta clave para identificar parámetros ambientales, geológicos y biológicos que pueden influir en la acumulación o presencia de hidrógeno. Estos índices permiten caracterizar factores como la vegetación, la humedad, el suelo y la actividad biológica, proporcionando información fundamental para su análisis.

Análisis geobotánico de alta resolución espacial

La vegetación ha sido un factor clave en la detección de áreas potenciales a la presencia de hidrógenos. Por lo que los índices espectrales utilizados consideran identificar variaciones en la salud de la vegetación y detectar áreas alteradas o afectadas por la presencia de hidrógeno. Aportando información clave sobre la cobertura vegetal y la humedad del suelo.

- NDVI (Índice Diferencial Normalizado de Vegetación): Evalúa la salud de la vegetación.
 - EVI (Índice de Vegetación Mejorado): Útil en áreas con alta biomasa.
 - SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo): Minimiza la influencia del suelo, ideal en zonas con vegetación escasa.
 - ARVI (Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera): Corrige efectos atmosféricos para una mejor precisión.
 - NDWI (Índice Diferencial Normalizado de Agua): Identifica cuerpos de agua y monitorea cambios hídricos.
 - GCI (Índice de Clorofila Verde): Mide el contenido de clorofila en las hojas.
 - SIPI (Índice Proporcional del Estrés Hídrico): Evalúa el estrés hídrico en las plantas.

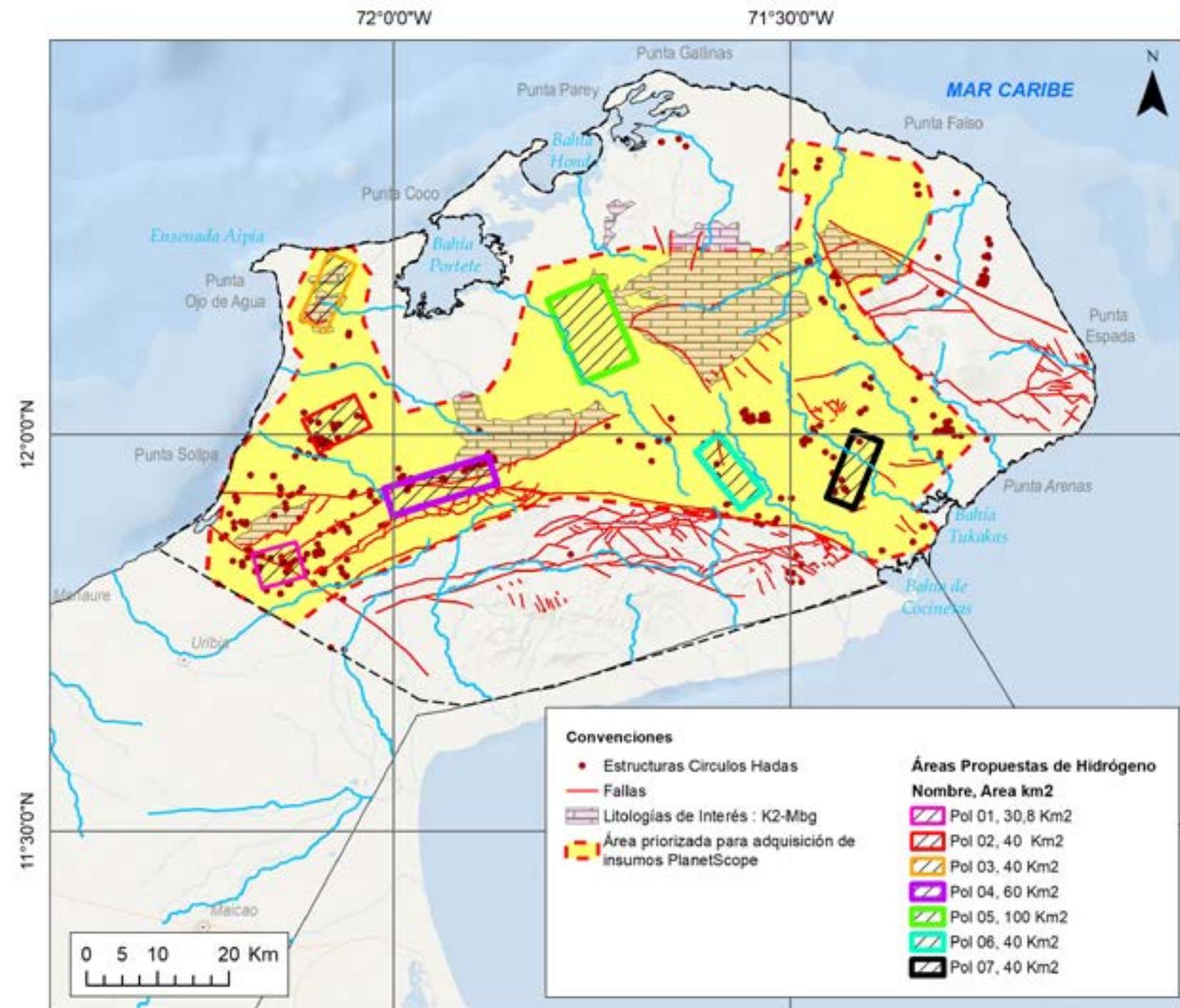


Figura 10.1 Priorización de áreas para adquisición de imágenes satelitales de PlanetScope en las cuencas de Portete, Serranía de Jara, Cosinetas y Chimare – Chichibacoa.

- DVI (Índice Diferencial de Vegetación): Calcula la diferencia entre NIR y VIS sin normalización.
 - PVI (Índice Proporcional Vegetal): Determina la proporción de vegetación en un área específica.
 - NSAVI (Índice Ajustado al Suelo Modificado): Optimiza estimaciones en zonas con densa vegetación.

La comparación de las tres temporalidades sugiere la necesidad de analizar la evolución de estos cambios y su posible correlación con estructuras geológicas.

ARVI

- Valor Min: -0.345
- Valor Max: 0.783
- Valor Medio: 0.559
- Desviación Estándar: 0.233

Los valores más altos, en rojo y amarillo, indican zonas con mayor actividad fotosintética y una vegetación más densa. Mientras que los valores más bajos, azul y celeste, corresponden a suelos desnudos, estrés vegetal o posibles alteraciones en la vegetación.

En el contexto del hidrógeno natural, estos valores anómalos, los más bajos, pueden sugerir áreas donde la actividad del gas ha modificado las condiciones del ecosistema. La correlación de estos valores con estructuras geológicas y anomalías espectrales (figura 10.2).

SIFI

- Valor Min: -1.000
- Valor Max: 1.000
- Valor Medio: 0.610
- Desviación Estándar: 0.485

Un valor cercano a 1 indica una mayor proporción de carotenoides, lo que puede reflejar estrés hídrico, senescencia vegetal o suelos desnudos., mientras que valores bajos o extremos sugieren una mayor proporción de clorofila, indicando vegetación más saludable y con menor estrés.

Las anomalías en este índice pueden señalar alteraciones en la vegetación causadas por la posible presencia de hidrógeno, afectando la disponibilidad de nutrientes y la fisiología vegetal, puede ayudar a identificar regiones con potencial para la presencia de hidrógeno blanco (figura 10.3).

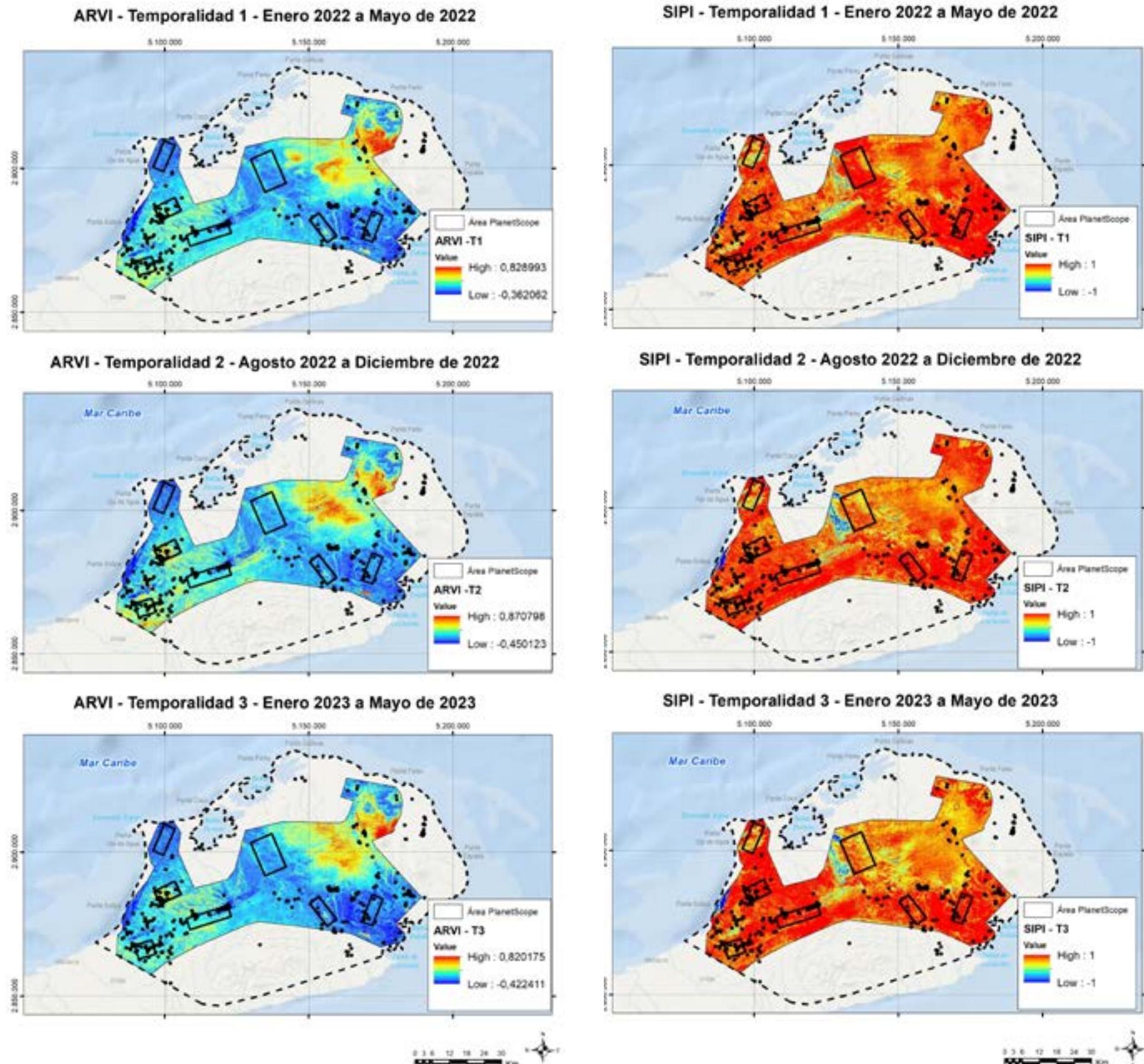


Figura 10.2 Índice ARVI a partir de imágenes satelitales PlanetScope.

Figura 10.3 Índice SIFI a partir de imágenes satelitales PlanetScope.

DVI

- Valor Min: -0.6323
- Valor Max: 0.2457
- Valor Medio: 0.096
- Desviación Estándar: 0.186

Las anomalías en los valores del DVI pueden señalar zonas donde el hidrógeno afecta la vegetación, inhibiendo su crecimiento debido a alteraciones químicas del suelo.

Los valores positivos indican una mayor biomasa y vegetación más densa, mientras que los valores negativos pueden reflejar suelos desnudos, cuerpos de agua o vegetación escasa. Las anomalías en el DVI podrían señalar zonas donde el gas ha alterado la vegetación o las condiciones del suelo (figura 10.4).

NSAVI

- Valor Min: -0.699
- Valor Max: 0.357
- Valor Medio: 0.145
- Desviación Estándar: 0.227

Los valores bajos, cercanos a -0.699, pueden reflejar suelos desnudos, cuerpos de agua o vegetación degradada, lo que podría ser un indicio de emisiones de hidrógeno.

Los valores altos, cercanos a 0.357, estos indican mayor biomasa y vegetación densa. En el contexto de la detección de hidrógeno, los valores anómalos en el NSAVI pueden indicar efectos del gas en la vegetación y el suelo, afectando la reflectancia espectral (figura 10.5).

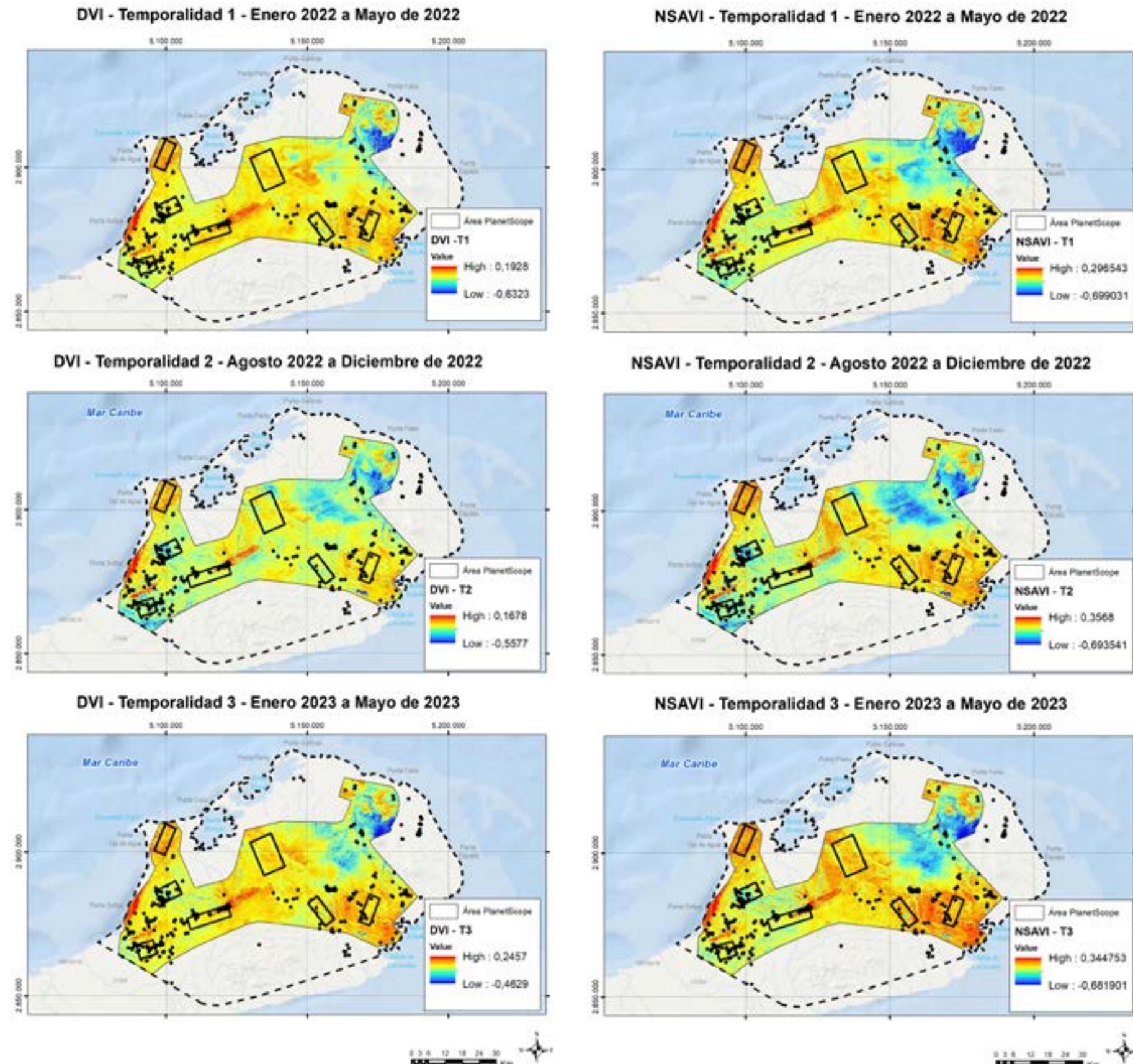


Figura 10.4 Índice DVI a partir de imágenes satelitales PlanetScope.

Figura 10.5 Índice NSAVI a partir de imágenes satelitales PlanetScope.

GLI

- Valor Min: -0.378
- Valor Max: 0.431
- Valor Medio: 0.292
- Desviación Estándar: 0.172

Un GLI bajo puede estar relacionado con una alteración en el suelo, posiblemente debido a la presencia de hidrógeno. Los valores altos, cercanos a 0.431, indican una vegetación con alta proporción de clorofila, lo que sugiere un buen estado fisiológico, mientras que los valores bajos, cercanos a -0.378, pueden representar zonas con menor cobertura vegetal, estrés hídrico o suelos desnudos.

Los valores atípicos en el GLI podrían estar relacionados con efectos del gas hidrógeno en la vegetación, modificando la fotosíntesis o alterando las condiciones del suelo (figura 10.6).

NDVI

- Valor Min: -1.00
- Valor Max: 0.931
- Valor Medio: 0.602
- Desviación Estándar: 0.412

Valores bajos de NDVI, cercanos a -1.0, pueden reflejar suelos desnudos, agua, o vegetación en estrés, mientras que los valores altos, cercanos a 0.931, indican vegetación saludable y densa.

Las anomalías en el NDVI pueden sugerir cambios en la vegetación debido a alteraciones en el suelo o en la disponibilidad de agua y nutrientes (figura 10.7).

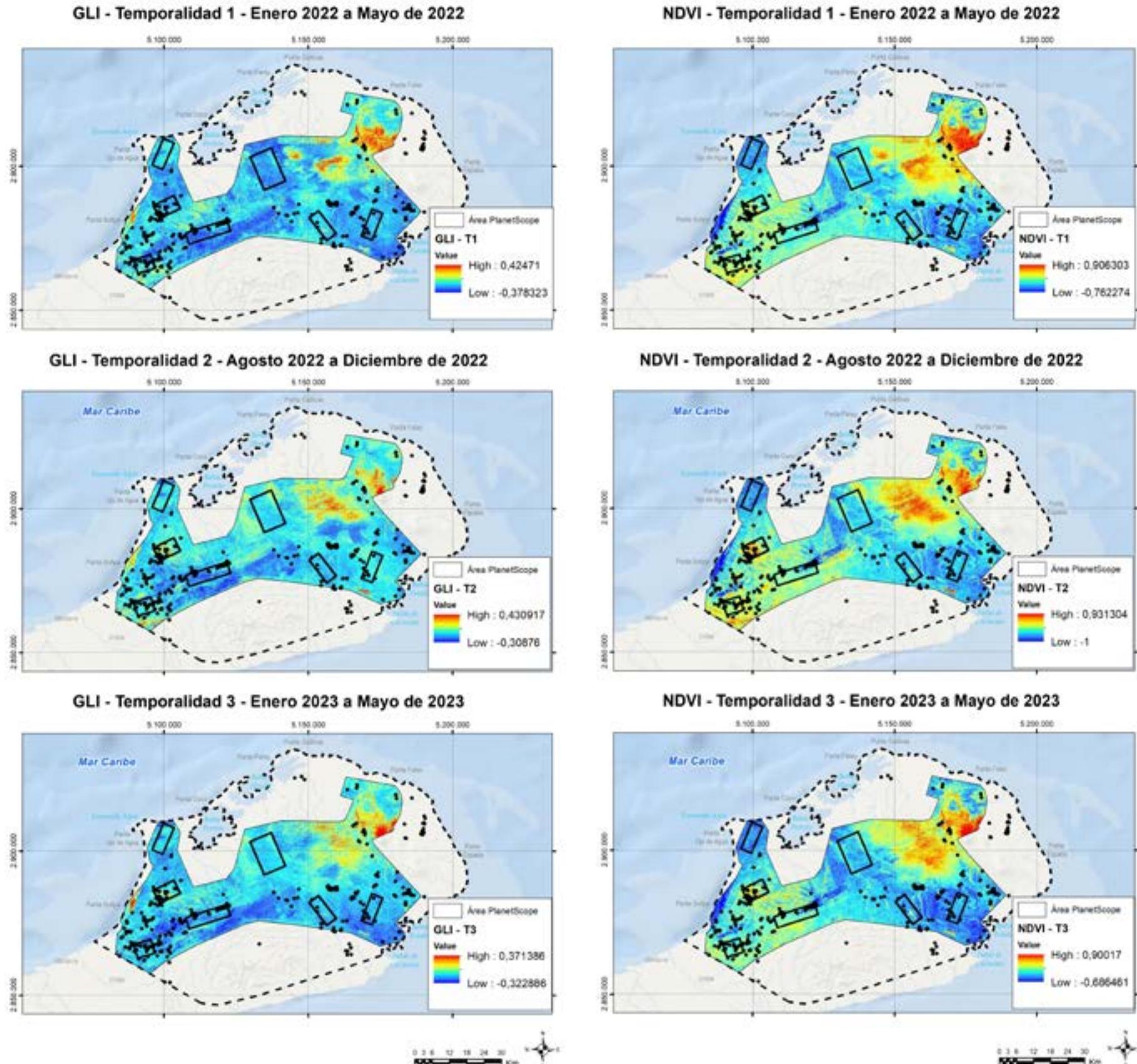
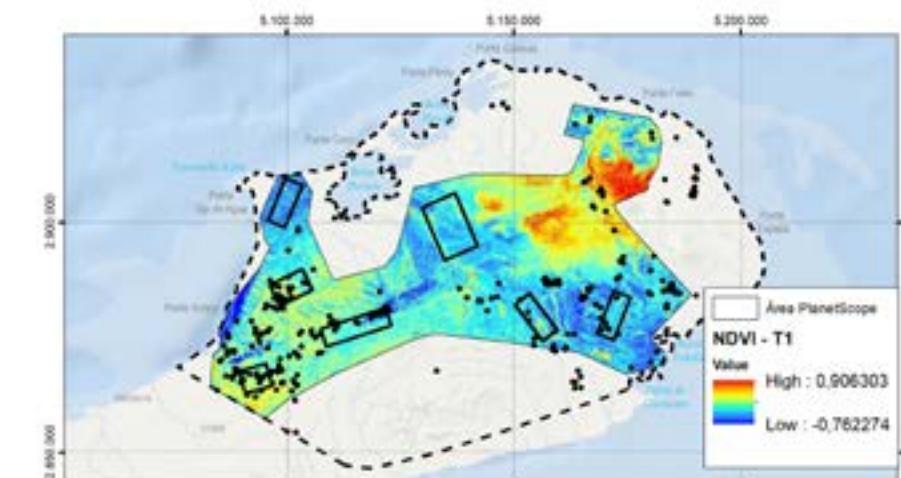
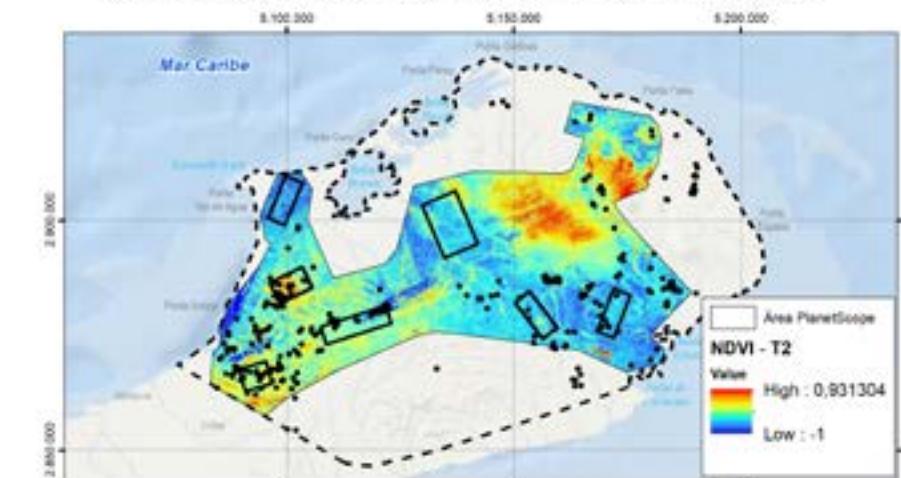


Figura 10.6 Índice GLI a partir de imágenes satelitales PlanetScope.

NDVI - Temporalidad 1 - Enero 2022 a Mayo de 2022



NDVI - Temporalidad 2 - Agosto 2022 a Diciembre de 2022



NDVI - Temporalidad 3 - Enero 2023 a Mayo de 2023

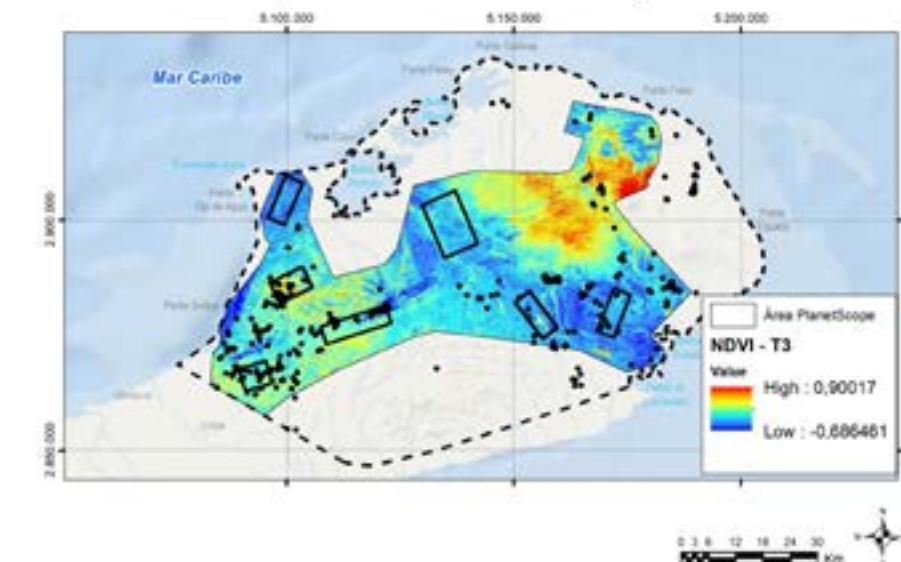


Figura 10.7 Índice NDVI a partir de imágenes satelitales PlanetScope.

NDWI

- Valor Min: -0.831
- Valor Max: 1.00
- Valor Medio: -0.689
- Desviación Estándar: 0.390

En áreas con emisiones de hidrógeno el NDWI puede ayudar a identificar zonas con humedad anómala, lo que podría estar asociado con filtraciones de gas, cambios en la composición del suelo o alteraciones en la disponibilidad de agua para la vegetación. Comparar estos valores en diferentes temporalidades puede ayudar a identificar patrones de cambio en el ecosistema.

Los valores altos, cercanos a 1.0, indican mayor contenido de agua, lo que puede significar zonas con cuerpos de agua, suelos húmedos o vegetación con alto contenido de humedad. Valores bajos, cercanos a -0.831, pueden representar suelos secos, vegetación en estrés hídrico o áreas sin agua (figura 10.8).

PVI

- Valor Min: -0.931
- Valor Max: 1.00
- Valor Medio: 0.667
- Desviación Estándar: 0.416

Los valores altos, cercanos a 1.0, estos indican vegetación densa y saludable y los valores bajos, cercanos a -0.931, pueden indicar suelos desnudos, vegetación en estrés o cuerpos de agua.

Los valores anómalos del PVI en relación con el hidrógeno, pueden estar relacionados con cambios en la vegetación debido a alteraciones en el suelo, estrés ambiental o modificaciones en la humedad y la estructura del ecosistema (figura 10.9).

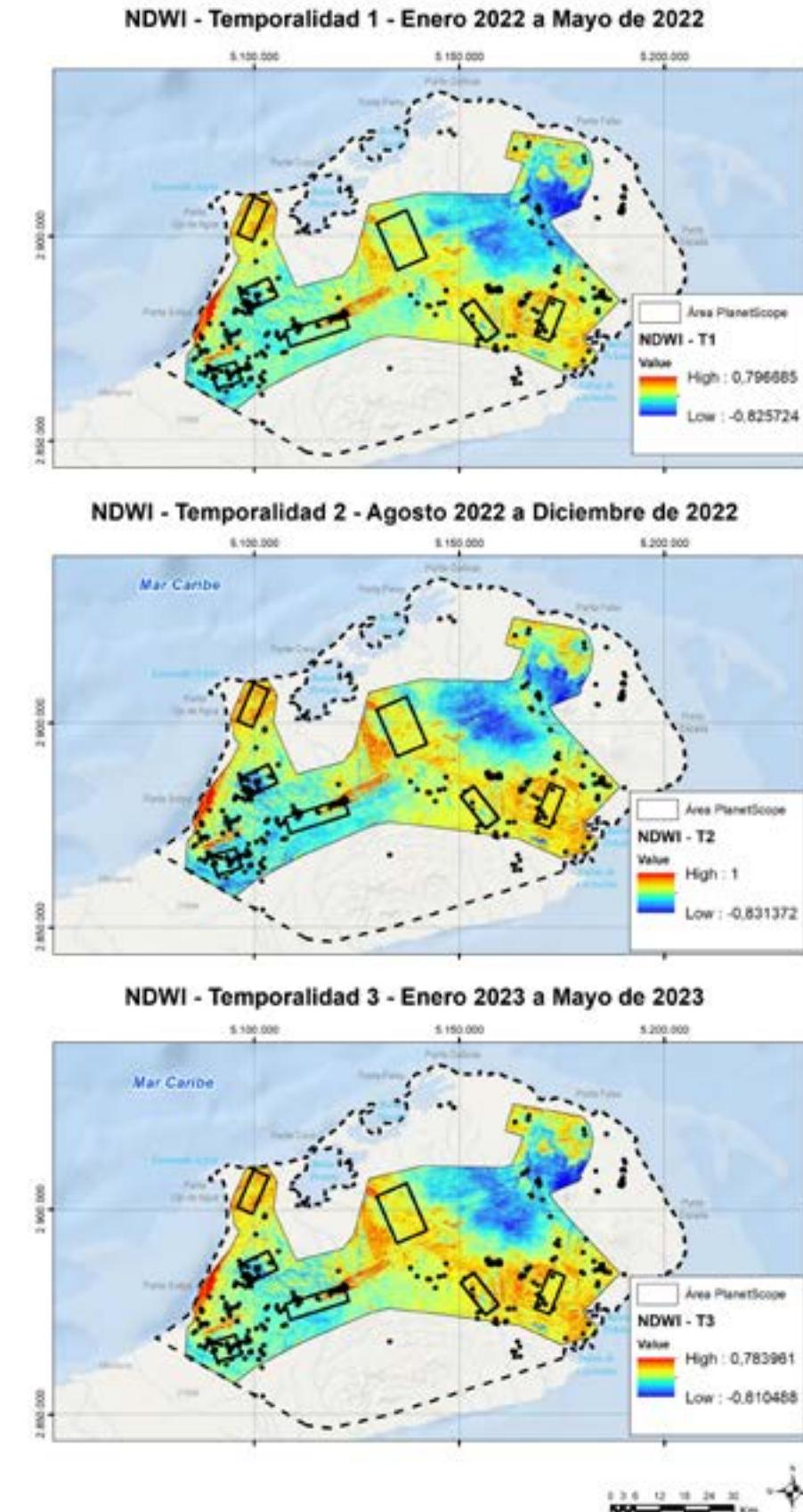


Figura 10.8 Índice NDWI a partir de imágenes satelitales PlanetScope.

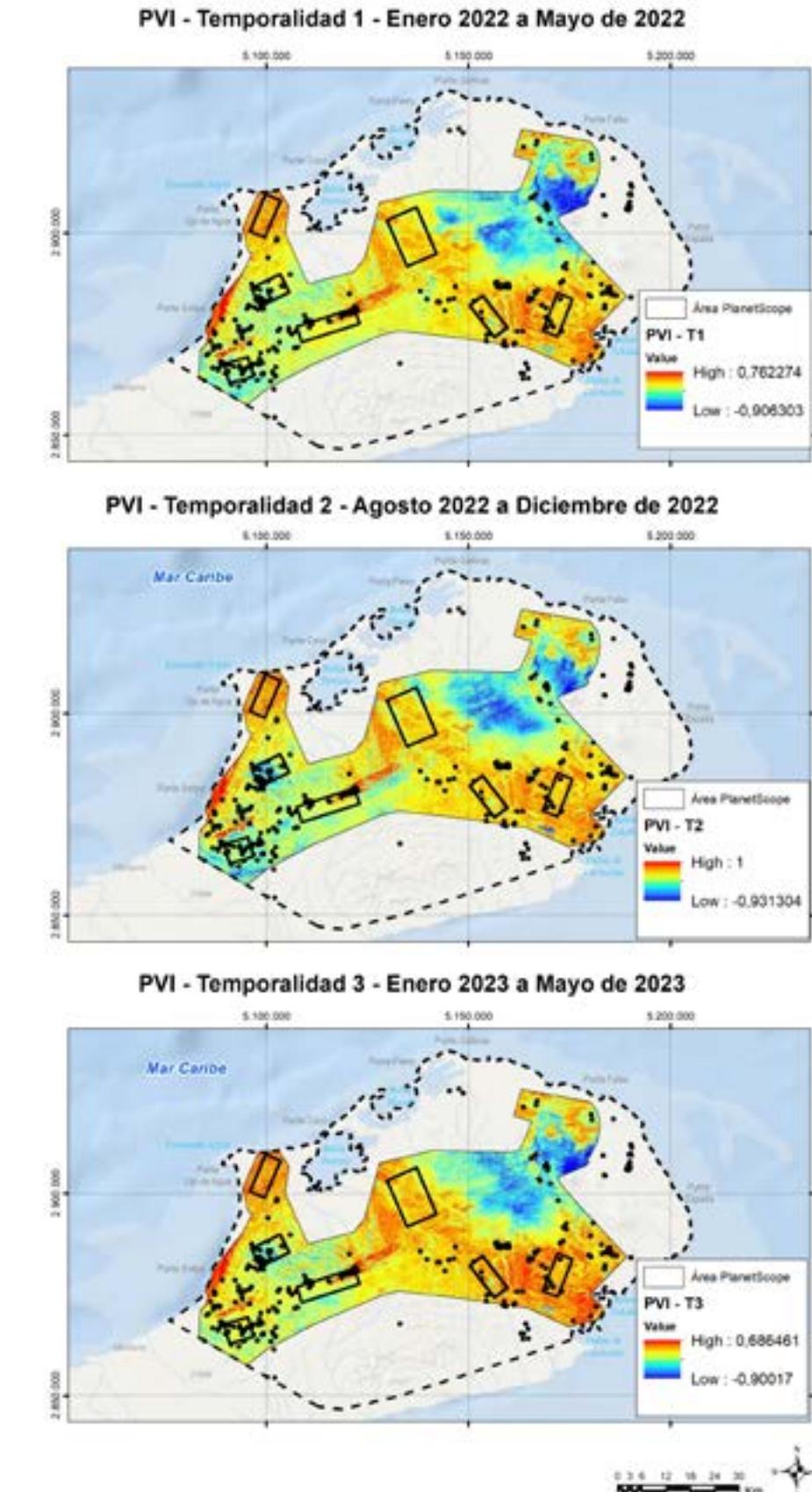


Figura 10.9 Índice PVI a partir de imágenes satelitales PlanetScope.

SAVI

- Valor Min: -0.762
- Valor Max: 0.347
- Valor Medio: 0.157
- Desviación Estándar: 0.238

Valores bajos de SAVI, cercanos a -0.762, pueden representar suelos desnudos, vegetación en estrés o áreas degradadas. Valores altos, cercanos a 0.347, indican mayor biomasa y vegetación saludable.

Los valores anómalos en el SAVI pueden sugerir cambios en la vegetación debido a alteraciones en el suelo o en la disponibilidad de agua y nutrientes (figura 10.10).

EVI

- Valor Min: -0.848
- Valor Max: 1.00
- Valor Medio: 0.687
- Desviación Estándar: 0.392

Los valores bajos, cercanos a -0.848, pueden representar suelos desnudos, vegetación degradada o estrés hídrico. Valores altos, cercanos a 1.0, indican vegetación densa y en buen estado.

En el contexto del hidrógeno, las anomalías en el EVI pueden sugerir cambios en la vegetación debido a alteraciones en la composición del suelo o modificaciones en la fotosíntesis.

El análisis de tendencias en el tiempo puede revelar posibles correlaciones con emisiones de gas y procesos geoquímicos (figura 10.11).

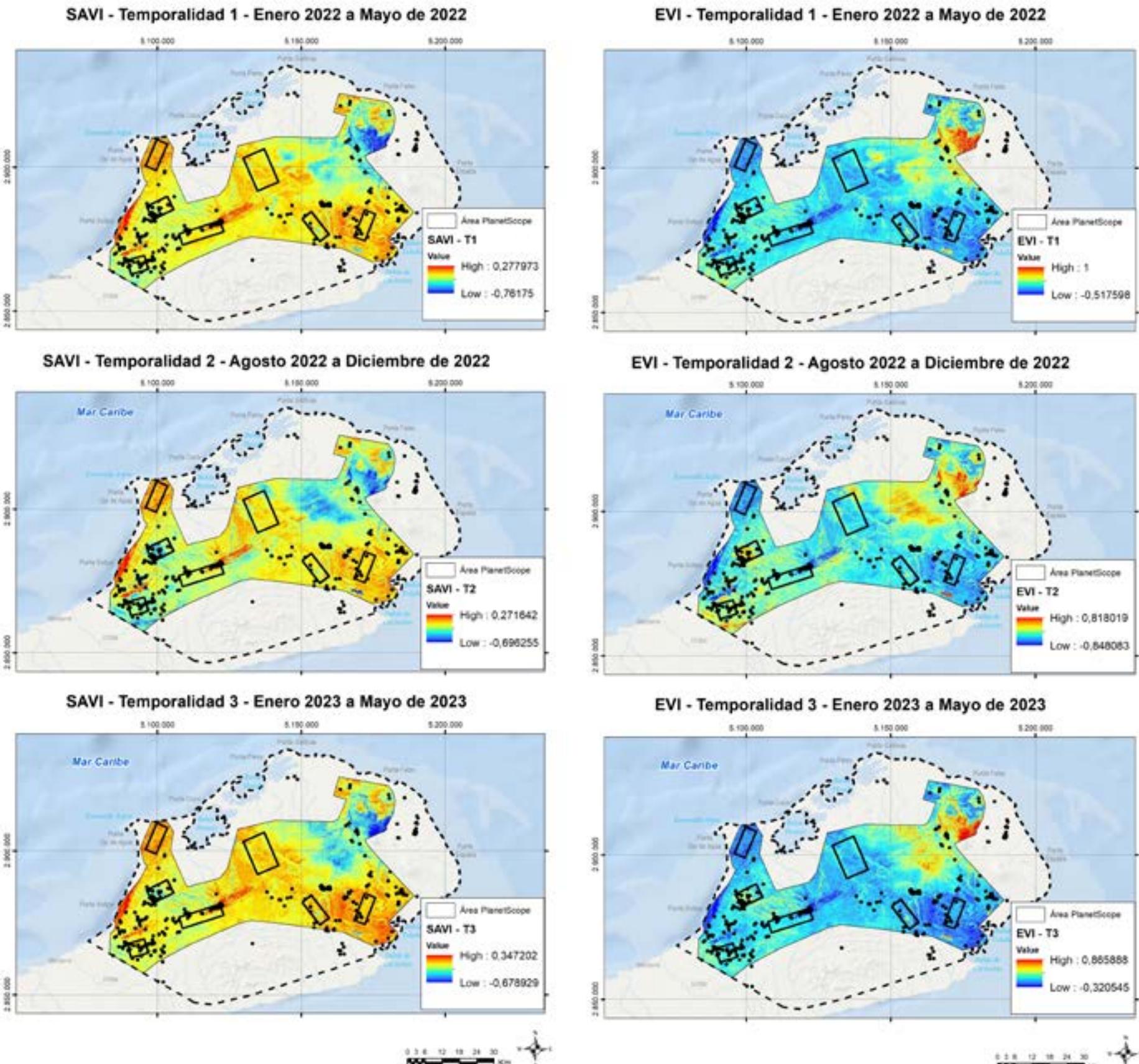


Figura 10.10 Índice SAVI a partir de imágenes satelitales PlanetScope.

Figura 10.11 Índice EVI a partir de imágenes satelitales PlanetScope.

El impacto del hidrógeno en la vegetación

Los índices como NDVI, EVI, SAVI y PVI tienen una correlación positiva alta con la salud y densidad de la vegetación. Asimismo, el NDWI se ha relacionado con indicios de que la vegetación con alta humedad tiende a tener altos valores en NDVI y EVI. Los índices DVI y GLI, se detectan cambios en la cobertura del suelo y la fotosíntesis, presentan correlaciones con SAVI y NDVI. Estos últimos son sensibles al

suelo y su influencia en la vegetación, relevantes en áreas con baja cobertura vegetal. Los índices SIPI y ARVI, relacionados con estrés ambiental, detectan la presencia de carotenoides y resistencia atmosférica, pueden estar influenciados por la actividad geológica (como posibles filtraciones de hidrógeno), la correlación de SIPI con NDWI y NDVI sugiere que el estrés hídrico puede afectar la composición de pigmentos en la vegetación. Las áreas con bajas correlaciones entre NDVI, EVI y NDWI pueden representar zonas con alteraciones en la vegetación debido a emisiones de gas,

igualmente los valores anómalos en ARVI y SIPI pueden sugerir cambios en la composición de pigmentos debido a alteraciones geoquímicas en el suelo, mientras que las disminuciones de NDVI y aumentos en SAVI/NSAVI podrían estar relacionados con la presencia de suelos desnudos o degradados por la actividad del hidrógeno.

El comportamiento de los índices en las diferentes temporalidades podría estar relacionadas con filtraciones de gas. La estabilidad de índices como NDWI y EVI sugiere una presencia constante de humedad y vigor vegetativo, mientras que fluctuaciones en PVI y SIPI podrían indicar variaciones en la composición química del suelo, las cuales pueden estar asociadas a la posible emisión de hidrógeno.

Además, la variabilidad de NDVI, SAVI y GLI en las distintas temporalidades podría ser un indicativo de alteraciones en el metabolismo vegetal debido a la exposición prolongada a concentraciones anómalas de hidrógeno.

Estudios previos como las investigaciones que analizan la influencia de otros gases, como el dióxido de carbono (CO_2), en la vegetación circundante, han demostrado que la vegetación en zonas con filtraciones de hidrógeno puede manifestar respuestas espectrales distintas, ya sea por estrés hídrico, modificaciones en la fotosíntesis o cambios en la biomasa.

influenciadas por la humedad y la vegetación densa.

2. Segundo Componente Principal (PC2)

Asociado a una variabilidad media o variaciones secundarias en la región, con una explicación de la varianza de 19.98%. Los índices que mayor aportan información son SIPI y ARVI, lo que indica que este componente podría estar reflejando variaciones en los pigmentos fotosintéticos y posibles interacciones con emisiones geológicas.

3. Tercer Componente Principal (PC3)

Considerado una variabilidad residual al solo explicar el 0.18% de la varianza. Este componente no muestra correlaciones significativas con los índices espectrales, lo que confirma que su contribución a la variabilidad es mínima y no representa un factor clave en la interpretación geobotánica.

La representación en R-G-B de los tres primeros componentes, PC1-PC2-PC3 respectivamente, (Figura 10.12), indica que las principales variaciones espectrales en la región, en áreas en rojo oscuro pueden corresponder a zonas con suelos desnudos o baja cobertura vegetal, las zonas en azul claro pueden representar áreas con mayor cobertura vegetal o humedad.

Análisis de componentes principales con PlanetScope

1. Primer Componente Principal (PC1)

Tiene una explicación mayoritaria de la variabilidad de los datos con un 79.84%. Los índices de mayor aporte de información son el NDWI, NDVI y PVI, lo que sugiere que las variaciones dominantes en la imagen están

Figura 10.12 Visualización RGB de los 3 primeros componentes Principales obtenidos de los 10 índices analizados.

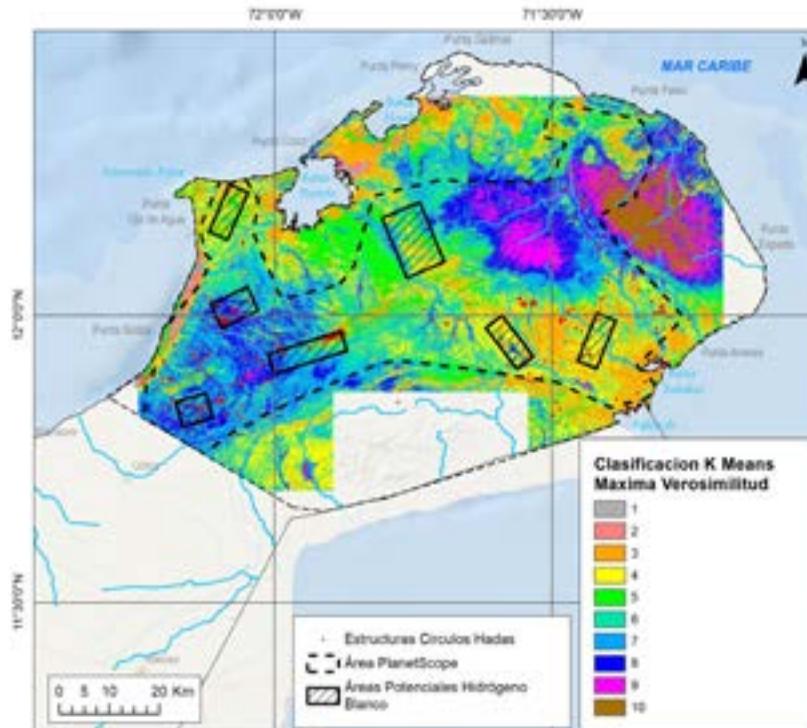


Figura 10.13 Resultados obtenidos de la implementación del algoritmo de Clasificación no supervisada basada en K-mean y máxima verosimilitud.

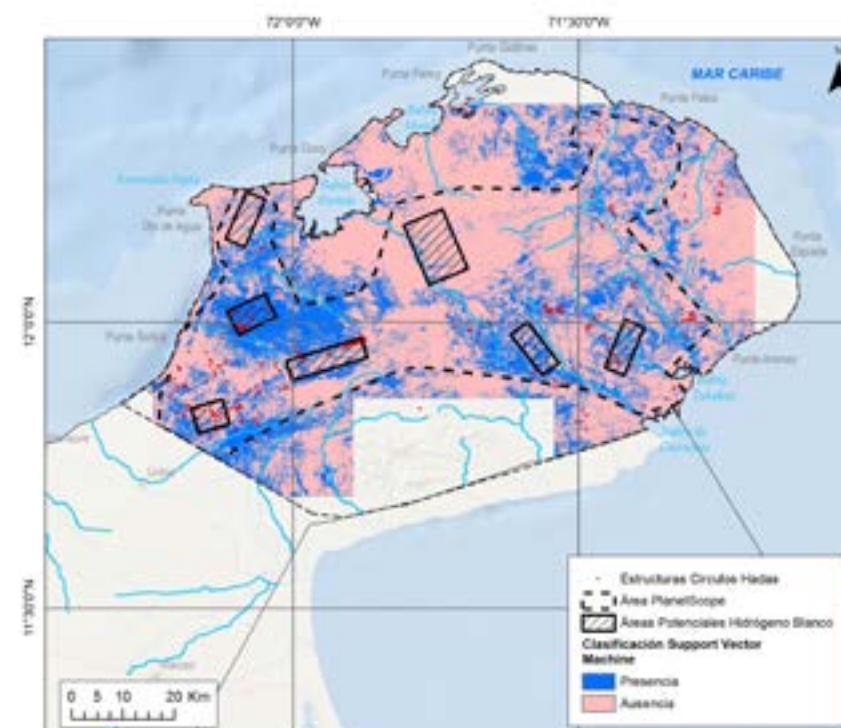


Figura 10.14 Resultados obtenidos de la implementación del algoritmo Support Vector Machine

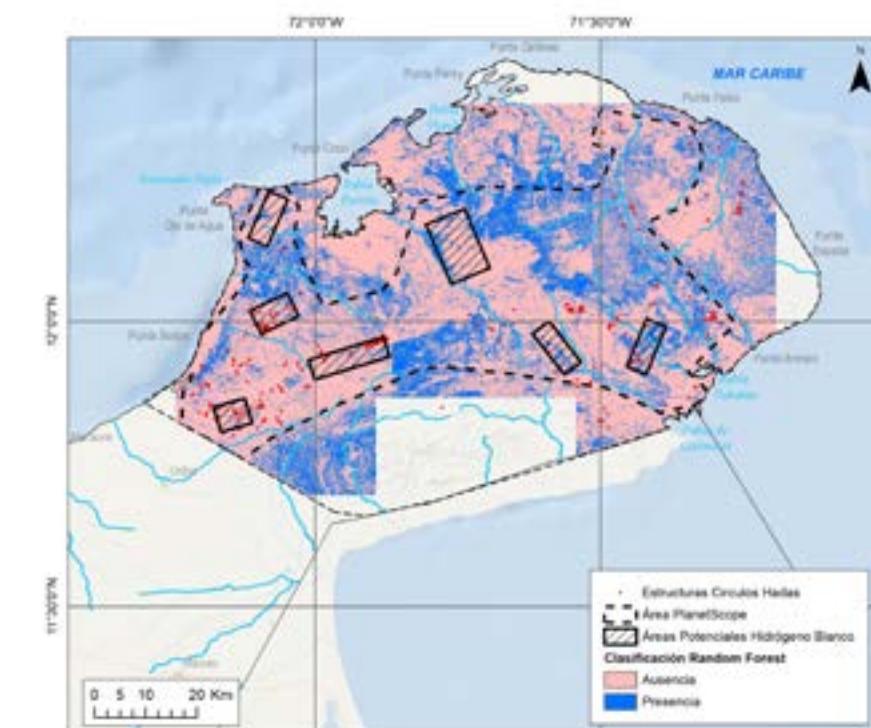


Figura 10.15 Resultados obtenidos de la implementación del algoritmo Random forest.

Clasificación supervisada y no supervisada con imágenes PlanetScope

Los métodos de clasificación supervisada y no supervisada destacan áreas que, por las condiciones de la vegetación y el suelo, presentan características muy similares a las identificadas mediante índices geobotánicos en los círculos de hadas de la zona. Estas áreas resaltadas incluyen subsectores en sectores reconocidos como Portete, Cocinetas, Macuira y el suroeste de la zona de estudio. Es importante enfatizar que, aunque estas zonas muestran similitudes en cuanto a los índices, esto no implica necesariamente que puedan catalogarse de manera inmediata como áreas potenciales de

emanación de hidrógeno. Sin embargo, representan un soporte valioso para identificar zonas de interés y guiar estudios más detallados. Se implementaron los métodos de clasificación supervisada, Random Forest (figura 10.15) y Support Vector Machine (figura 10.14) y para la clasificación no supervisada el algoritmo de K-Means (figura 10.13)

Los algoritmos muestran algunas discrepancias en sectores puntuales, como en la parte norte de Macuira y el sector sur de la región de La Guajira, existe una correspondencia significativa en el sector centro-este-oeste, incluyendo áreas como Portete y Cocinetas. Estos resultados respaldan la selección de estas áreas para estudios más detallados, fortaleciendo las conclusiones derivadas del análisis multitemático y multidisciplinario.

Es importante resaltar que los resultados obtenidos con el algoritmo Random Forest en las imágenes de PlanetScope y Sentinel-2 fueron consistentemente similares, ya que en ambos casos se utilizaron componentes principales derivados de índices geobotánicos.

Esto demuestra la capacidad del método para identificar patrones relevantes de manera robusta, independientemente de la resolución espacial de las imágenes. La coherencia entre ambas fuentes de datos refuerza la confianza en los resultados.

CAPÍTULO 11

Hallazgos clave y oportunidades para el Futuro

La identificación de círculos de hadas en la Alta Guajira se llevó a cabo mediante una metodología innovadora que combinó teledetección, machine learning y el conocimiento geológico local para detectar patrones superficiales relacionados con estas estructuras. El uso de modelos de machine learning, junto con análisis espectrales y geofísicos, permitió desarrollar un enfoque robusto que facilitó la identificación de zonas de interés.

Los índices espectrales fueron fundamentales para correlacionar variaciones en la salud de la vegetación y características del suelo con posibles alteraciones asociadas a la presencia de hidrógeno. Estas alteraciones, que se manifiestan en la superficie como los círculos de hadas, están vinculadas a la toxicidad del hierro ferroso, el cual es responsable de generar la sintomatología observada.

Las anomalías de hierro, que van desde el estado ferroso al férrico, son cruciales en el análisis geobotánico. La interacción entre los factores bioquímicos del suelo y su impacto en plantas como el Trupillo estudiado es evidente. Además, la anoxia radicular generada por el H₂ libre, su reacción con el Fe en los suelos y la consiguiente alcalinización provocan una anomalía geobotánica clara, representada por los círculos de hadas en la zona de estudio.

Los Polígonos 1, 3, 4 y 5 muestran anomalías magnéticas y gravimétricas que, en conjunto con la geología local, sugieren la presencia de rocas con alto potencial para la exploración de hidrógeno natural. Esto subraya la importancia de comprender el modelo geológico de la región y los diversos procesos involucrados en la generación de hidrógeno natural.

Los Polígonos 1 y 4, ubicados cerca de estructuras tectónicas significativas, sugieren una posible generación y migración del recurso. Por otro lado, los Polígonos 2, 6 y 7 podrían estar vinculados a procesos de generación o almacenamiento de hidrógeno debido a las estructuras geológicas profundas. Es fundamental tener en cuenta que el flujo de hidrógeno está relacionado con el fracturamiento y la conexión entre las diferentes familias de discontinuidades.

Finalmente, el análisis de la temperatura superficial terrestre y los puntos calientes emergentes muestra una concordancia con los polígonos que abarcan unidades geológicas como los esquistos de Jarara. Los píxeles con temperaturas más altas, observados entre 2013 y 2024, coinciden con los círculos de hadas previamente cartografiados, respaldando la selección de estas áreas para su estudio y potencial exploración.



Fotografía: Manuel Zafra.

CAPÍTULO 12

Estrategias clave para maximizar
el impacto



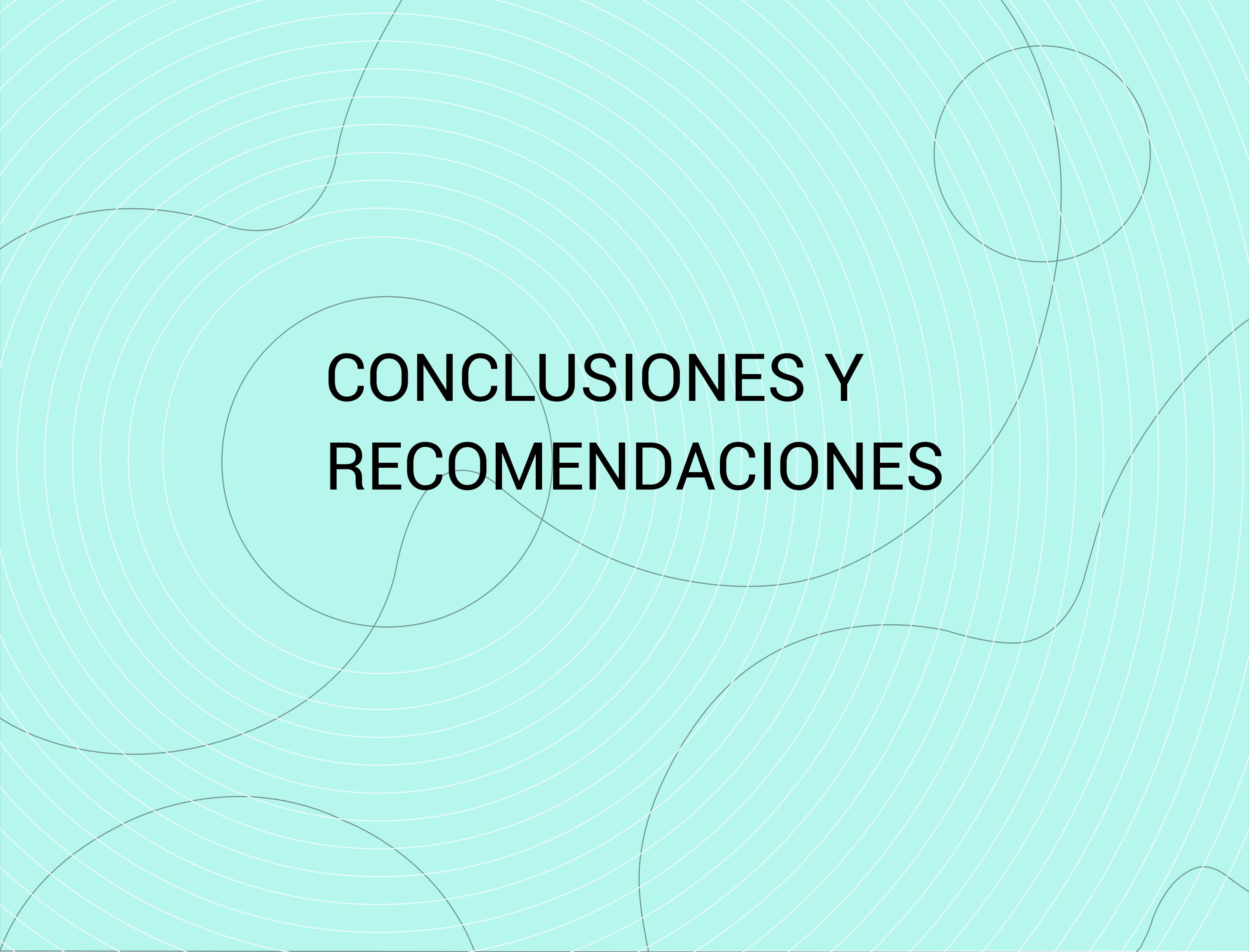
Fotografía: Manuel Zafra.

El "sistema de hidrógeno" describe la generación, migración y atrapamiento del hidrógeno, y se presenta como un análogo del "sistema petrolero". Sin embargo, existen diferencias clave: mientras que la roca madre del petróleo está dentro de la cuenca, la roca madre del hidrógeno se encuentra en el basamento, geológicamente separada de los sedimentos donde migrará. Además, la generación de hidrógeno por serpentinización se considera un proceso geológicamente "instantáneo", a diferencia de la lenta formación de los hidrocarburos.

En el proceso de generación y expulsión de hidrógeno, el fracturamiento juega un papel crucial al facilitar la expulsión del hidrógeno del protólito. Este aumento de volumen genera una red de vetas que facilita la migración. Además, se especula que la expulsión de hidrógeno podría ser asistida por fracturación tectónica, especialmente en sistemas de fallas que permiten la entrada de agua al protólito. Se debe aplicar trabajos iterativos de validación continua de los resultados obtenidos, incorporando datos de manera progresiva conforme se van comprendiendo el comportamiento de las variables en los modelos en busca de ser mejorados.

Estas nuevas entradas o variables tienen como objetivo el poder redefinir la precisión en la identificación de círculos de hadas, identificando cuáles son las de mayor relevancia en su identificación. La ingesta de nueva información debe ser controlada, garantizando que los métodos utilizados sigan siendo adecuados y precisos en diferentes contextos geográficos.

Con énfasis en la exploración de hidrógeno, a medida que se va adelantando el trabajo de interpretación y análisis de las imágenes satelitales, se debe adelantar la selección de puntos de control en el área de estudio, los cuales incluyan el levantamiento y muestreo de las secuencias de interés, su vegetación y cuerpos de agua presentes. En estos lugares, se debe realizar un énfasis principal en la descripción de las estructuras (fallas, fracturas, diaclasas), la clasificación del régimen de deformación de las unidades, el análisis sistemático del patrón de fracturamiento y sus minerales de relleno, la definición de las alteraciones y reacciones identificadas en los minerales, con el fin de que se facilite el planeamiento para la adquisición de imágenes hiperespectrales, el levantamiento y análisis geofísico detallado (Ej. magnetometría, gravimetría y magnetotelúrica, entre otros), el muestreo geoquímico, los análisis DRX y SEM de la zona de interés y, el monitoreo sistemático con sensores específicos para hidrógeno, que permitan una mayor caracterización y delimitación de la anomalía.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Haciendo una consulta en la plataforma de Earth Explorer desde el 2013 y un filtro por nubosidad de 15%, un total de 430 imágenes se descargaron correspondientes al Nivel 2 de Landsat. En consideración de la calidad del producto suministrado por el USGS del Nivel 2 o Producto Científico de Nivel 2 (L2SP) del satélite Landsat 8, que incluyen un alto nivel de correcciones que ya disponen las imágenes, se procederá a realizar el cálculo de variables para este catálogo de imágenes.

El aplicativo de Google Earth Engine (GEE) permite de manera online hacer uso de imágenes satelitales mediante código Java o Python, siendo este uno de los posibles limitantes de trabajo. Para cada satélite también se cuenta con diferentes colecciones o recursos de imágenes, aun así, la mayor ventaja de hacer uso de esta plataforma es poder realizar análisis preliminares en la toma de decisiones. Entre las pruebas realizadas y consideraciones se observó que, aunque se maneje un criterio de nubosidad, para algunos círculos de hadas se observó que era cubierto parcial o completamente por una nube. También que la verdosidad del área era variada siendo casi siempre árido e influenciado también por la temporada de lluvias o sequía, mediante mosaicos de toda el área de estudio.

Bajo estas consideraciones de la información de Landsat 8 y GEE se recomienda que el proceso de generación de mosaicos se realice como último paso posterior a la generación de todas las variables deseadas. En consideración de que el producto L2SP de Landsat 8 tiene una banda de calidad de píxel y máscaras para la identificación de nubes y sombras, al igual que los mosaicos se puede considerar hacer el uso de estas mismas finalizado el proceso de la estimación de variables u otros productos futuros como lo pueden ser aplicación de algoritmos de clasificación para facilitar el trabajo de estos.

La metodología para identificar círculos de hadas en la Alta Guajira combina técnicas de teledetección y machine learning, apoyadas por el conocimiento geológico local, para detectar patrones superficiales relacionados con estas estructuras. Utilizando modelos de machine learning y análisis espectrales y geofísicos, se logró proporcionar un enfoque robusto para la detección. La integración de índices espectrales mejoró el rendimiento de los modelos, superando versiones anteriores con puntajes de entrenamiento y validación superiores a 0.90 y áreas bajo la curva (AUC) cercanas a 0.99. La alta correlación positiva entre índices de vegetación como NDVI, SAVI y EVI

refleja la salud de la vegetación, mientras que la correlación negativa con NDWI sugiere diferencias en la cobertura vegetal. Además, el índice de hierro ferroso y su relación con la vegetación indican que el contenido mineral del suelo influye en la salud vegetal, destacando unidades geológicas de interés.

Para el preprocesamiento, procesamiento y cálculo de variables de imágenes satelitales Landsat 8 Nivel 2 se realizó la implementación de unos scripts debido a la gran cantidad de escenas con las que se cuentan, superando las 400 imágenes. Esta automatización permitió optimizar el flujo de trabajo, desde la preparación y escalado de los valores hasta el cálculo de índices espectrales, facilitando la obtención de productos para posteriores análisis geobotánico y geológico en el área de la Alta Guajira.

El análisis de las imágenes de Landsat 8 reveló que la mayoría de las bandas presentan una correlación lineal significativa, a excepción de la Banda 5 y la Banda 10. Los resultados del primer análisis de componentes principales (PCA) indican que las Bandas 10 y 5 son las más relevantes en la generación de los dos mejores componentes. En el modelo de regresión logística implementado, se observa que las Bandas 4 y 3 tienen los mayores pesos, lo que sugiere que aportan más información al clasificar un píxel como asociado a un círculo de hadas (FC) o no. Por otro lado, en el modelo de bosques aleatorios, la importancia de las variables de entrada indica que las Bandas 3, 10 y 5, en ese orden, son las que más contribuyen a la clasificación de los píxeles. En la segunda versión se obtuvo que para los modelos de regresión logística y bosques aleatorios comparten como variables de interés: Ferrous Iron, Banda 6, CVI, Alteration Rock, Banda 3, Ferric Iron Fe3, EVI y Banda 5. Aunque no son variables en común en ambos modelos, las variables de Banda 4, SAVI y Ratio Eisenhydroxid también están entre las diez primeras variables de peso para los modelos.

Al realizar la integración de índices espectrales en los modelos de machine learning ha permitido mejorar el rendimiento de los algoritmos utilizados para identificar la presencia de círculos de hadas en imágenes de satélite Landsat 8 L2. Incorporando 20 índices espectrales, se logró la mejora de los modelos, superaron a las versiones anteriores, con puntajes superiores al 0.90 en entrenamiento y validación, y áreas bajo la curva (AUC) cercanas a 0.99.

La alta correlación positiva de Pearson entre los índices de vegetación NDVI, SAVI y EVI indica su similitud en la representación de la salud de la vegetación en la zona. En contraste, la correlación de estos índices con el NDWI es negativa. Además, la correlación moderada entre el índice de hierro ferroso y los índices de vegetación, junto con el análisis trimestral de 2022 y 2023, revela cambios en la cobertura vegetal y la salud de la vegetación, sugiriendo que el contenido mineral del suelo puede influir en la vegetación. El índice de hierro ferroso destaca varias unidades geológicas de interés en el análisis trimestral en su mayoría, en los cuales al comparar con el NDVI presentan valores bajos.

Los Polígonos 1, 3, 4 y 5 presentan anomalías magnéticas y gravimétricas que junto con la geología del área se pueden asociar a presencia de rocas con potencial para la exploración de hidrógeno natural. Considerando los diferentes procesos de generación del hidrógeno natural.

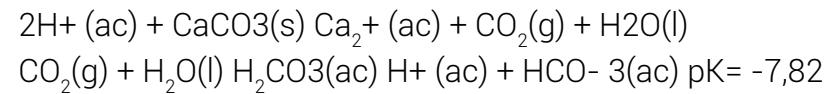
Los Polígonos 1 y 4 presentan una cercanía a las estructuras tectónicas presentes en la región, por lo que en ellas se puede estar presentando una generación y migración del recurso. Mientras que en los Polígonos 2, 6 y 7 se podría considerar procesos de generación o almacenamiento por las estructuras geológicas profundas.

En la metodología de integración de técnicas de teledetección y machine learning se identifica como áreas de interés los Polígonos 1, 2, 4 y 5, los respaldan la elección de áreas con interés geológico.

El análisis de temperatura superficial terrestre y de puntos calientes emergentes, arroja concordancia entre los polígonos que abarcan unidades geológicas como los esquistos de Jarara, los píxeles identificados con temperaturas más altas en el periodo de observación 2013-2024 y con los círculos de hadas previamente cartografiados, respaldando así la selección de estas áreas.

La adquisición de imágenes PlanetScope para la zona de estudio, cubre un área de 3507.9 km² e incluye las unidades geológicas de interés priorizadas por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) y, los siete polígonos establecidos para el levantamiento de información hiperespectral definidos en el marco del proyecto.

En los suelos calizos el pH de la disolución del suelo y la concentración de ión bicarbonato están controlados por las reacciones:



Esto hace que la mayoría de los suelos calizos tengan un valor de pH que oscila entre 7,5 y 8,5; pudiendo llegar incluso a valores superiores a 9 cuando en los suelos existen contenidos apreciables de NaHCO_3 disuelto. A estos pH la concentración de Fe soluble es bastante baja (Lindsay, 1979, 1991; Lindsay y Schwab, 1982) y por tanto se dificulta la nutrición férrica del vegetal. Además, se ven perjudicados los principales mecanismos de respuesta de la planta a la deficiencia de hierro: se neutralizan los protones liberados por el vegetal, la alcalinización reduce la secreción de compuestos fenólicos y dificulta la reducción de Fe (III) en la membrana plasmática (Römhild y Marschner, 1986).²⁶

A la hora de analizar los efectos de la toxicidad de Fe en el vegetal debemos tener en cuenta que de los dos estados de oxidación que presenta el Fe, es el ion ferroso el que puede causar esta sintomatología. Como se ha indicado a lo largo del tema en condiciones aeróbicas es muy extraño que se produzca una acumulación de Fe (II) en el suelo, sin embargo, en condiciones anaeróbica, el Fe (III) se reducirá a Fe (II) siendo esta la especie más abundante e incrementando la solubilidad de Fe en el suelo. Por lo que la toxicidad de hierro no se conoce en condiciones normales de cultivos, sin embargo, en los arrozales esta situación es muy común por lo que la toxicidad del Fe (II) puede ser un aspecto nutricional importante que se debe entender.

Estas anomalías de hierro en desde ferroso a férrico tienen una importancia relevante en el análisis geobotánico, ya que la conjunción de los factores bioquímicos del suelo y su repercusión en las plantas como el Trupillo estudiado es evidente, de igual manera la anoxia radicular observada por la generación de H_2 libre, su reacción con el Fe presente en los suelos y la alcalinización de los mismos produce una anomalía geobotánica evidente en la zona de estudio, representada en los círculos de hadas.

El procesamiento de los datos para la identificación de familias de discontinuidades se realizó de manera gráfica, mediante la proyección estereográfica, representando los polos o planos con valores medios de las diferentes familias de discontinuidades; diagramas de rosetas que permiten representar un gran número de medidas de orientación de forma cuantitativa, permitiendo una visión general de las familias y sus orientaciones respectivas, para así generar un modelo probabilístico que puedan presentar inestabilidad.

Se realizaron 28 análisis cinemático de las rocas aflorantes desde el paleozoico al neógeno, macizos rocosos que presentaron datos estructurales con información secundaria dentro del área de estudio, datos de foliación para rocas metamórficas, datos de orientación de fracturamiento en rocas ígneas y macizos sedimentarios del jurásico, datos de estratificación de las rocas sedimentarias del cretácico, paleógeno y neógeno.

Los esfuerzos principales presentes están orientados de SW-NE, los esfuerzos secundarios presentarán también una orientación de SW-NE.

En esta zona de estudio se podría presentar deslizamientos mínimos en cuñas y planar, cuando las pendientes son mayores o iguales a 70° estas áreas son parcialmente estables. Las pendientes menores a estos son estables.

El informe se elabora con información secundaria obtenida del área de la Guajira con la geología que se intercepta con las planchas geológicas 1:100000 del servicio geológico colombiano.

El uso de herramientas en línea como Google Earth Engine (GEE) facilita el análisis de áreas de interés, permitiendo identificar la cobertura de nubes sobre los círculos de hadas, y evaluar si están parcial o completamente cubiertos, además de observar la variabilidad de la vegetación, influenciada por factores como la temporada de lluvias o sequía. Sin embargo, para la generación de mosaicos, se optó por descargar las imágenes y procesarlas en un entorno de escritorio, lo que permitió un mejor control de calidad. Para automatizar algunas tareas, se implementaron algoritmos controlados, asegurando su correcta ejecución y productos de calidad esperada. En total,

se descargaron 416 escenas del Nivel 1 y 430 del Nivel 2 de Landsat 8, 27 escenas del Nivel 2 de Landsat 9, 51 escenas del Nivel L2A de Sentinel 2, 442 escenas de Aster, 2 imágenes de radar de Sentinel 1 y 8 imágenes de EnMap.

La adquisición de imágenes PlanetScope cubre un área de 3507.9 km², incluyendo las unidades geológicas priorizadas por la ANH y los siete polígonos definidos en el proyecto.

Se procesaron las imágenes de PlanetScope para calcular diversos índices espectrales para caracterizar las áreas de interés para identificar factores relacionados con la vegetación, la humedad, el suelo y la actividad biológica. Los índices como ARVI, SIPI, DVI y NDVI ayudan a detectar alteraciones en la vegetación causadas por la presencia de hidrógeno, reflejando posibles interacciones subterráneas o cambios en la bioquímica del suelo. El NSAVI y el SAVI indican suelos alterados que podrían estar vinculados a emisiones de hidrógeno, mientras que el GLI y el PVI proporcionan información sobre la densidad de la vegetación y variabilidad en terrenos con fracturas geológicas asociadas a la migración de hidrógeno. El NDWI y el EVI, por su parte, permiten evaluar la humedad del suelo y los impactos en la vegetación densa, respectivamente. Estos índices son herramientas clave para monitorear áreas afectadas por hidrógeno natural.

La implementación de los métodos de clasificación supervisada y no supervisada permitió identificar zonas de interés con características geobotánicas similares a las observadas en los círculos de hadas. En particular, los métodos supervisados, como Random Forest y Support Vector Machine, demostraron ser herramientas efectivas para resaltar áreas potenciales, respaldando las estrategias de exploración. Aunque ambos métodos presentaron discrepancias en sectores específicos, su correspondencia en áreas clave como Portete y Cocinetas refuerza la validez de estos enfoques como soporte inicial para la selección de zonas para estudios más detallados.

Recomendaciones

Se debe aplicar trabajos iterativos de validación continua de los resultados obtenidos, incorporando datos de manera progresiva conforme se van comprendiendo el comportamiento de las variables en los modelos en busca de ser mejorados. Estas nuevas entradas o variables tienen como objetivo el poder refinar la precisión en la identificación de círculos de hadas, identificando cuales son las de mayor relevancia en su identificación. La ingesta de nueva información debe ser controlada, garantizando que los métodos utilizados sigan siendo adecuados y precisos en diferentes contextos geográficos.

Es necesario continuar implementando mejoras en los scripts de procesamiento para Landsat8 Nivel 2, entre las cuales pueden estar la integración de nuevas metodologías de resampleado, enmascarado de nubes y sombras mediante inteligencia artificial, así como el incluir y mejorar el catálogo de índices disponibles para este satélite que puedan proporcionar información de para este u otros proyectos similares en la exploración remota. Entre otros posibles, se encuentra la integración con otros satélites para obtener una mayor cobertura temporal, espacial y espectral.

- Para mejorar la detección de estructuras asociadas con círculos de hadas en las áreas áridas de la Alta Guajira, se recomienda utilizar imágenes de mayor resolución espacial que permitan capturar estructuras más pequeñas. Además, es importante considerar los resultados de los análisis de pesos de cada una de las bandas en el PCA, Regresión Logística y Bosques Aleatorios, que destacan la relevancia de varias bandas e índices espectrales en la clasificación de un píxel como asociado a un círculo de hadas o no. Adicional se debe realizar un ajuste específico de los modelos utilizando datos de la región de Alta Guajira que podrían mejorar la precisión y la relevancia de las predicciones.

Se sugiere planificar un flujo de trabajo integral y organizado que permita coordinar de manera eficiente diversos procesos, como el procesamiento y análisis de recursos satelitales, la exploración del suelo y subsuelo, y las mediciones de hidrógeno en campo. Este enfoque, facilitará la comparación de resultados obtenidos en cada uno de estos ámbitos, ya sea de forma secuencial o paralela, además, permitirá desarrollar análisis y

conclusiones más fundamentadas, favoreciendo la formulación de hipótesis aproximadas sobre el potencial de las áreas en estudio respecto a la emanación de hidrógeno.

Se debe realizar un diagnóstico de las capacidades computacionales disponibles, incluyendo plataformas, software respecto a las características del área de estudio y su extensión, donde se implementarán los diferentes algoritmos. Asimismo, es fundamental evaluar las competencias técnicas del equipo profesional involucrado, especialmente en el manejo de los distintos softwares y lenguajes de programación previstos en el trabajo exploratorio de hidrógeno. Este diagnóstico permitirá planificar rutas de procesamiento de datos más eficientes, optimizando los recursos disponibles y apoyando la obtención de resultados robustos y alineados con los objetivos de la exploración.

La exploración de los círculos de hadas, formaciones circulares y/o subcirculares en el terreno que pueden estar relacionadas con emisiones naturales de hidrógeno, requiere un enfoque integral que combine teledetección, trabajo de campo y análisis científico multidisciplinario. Inicialmente, para la zona de estudio se empleó imágenes satelitales para identificar patrones geomorfológicos y geobotánicos asociados, como concentraciones de hidrógeno blanco alrededor de bordes de estas estructuras subcirculares y/o circulares, una característica identificada en estudios recientes en Australia. En el área de estudio estas técnicas permitieron la identificación de áreas más precisas para investigaciones más detalladas en el terreno.

Es recomendable el trabajo de campo el cual debe incluir la recolección de muestras de suelo, vegetación, microbiología, y mediciones de gases en el subsuelo. Estas mediciones, como las realizadas en el North Perth Basin (CSIRO, 2021), han demostrado que las interacciones entre agua y rocas ricas en hierro pueden generar hidrógeno, con fallas geológicas actuando como conductos para su migración hacia la superficie. Además, el análisis microbiológico puede revelar adaptaciones únicas en los microorganismos locales que podrían explicar las dinámicas de los círculos y la interacción del hidrógeno con el ecosistema.

Paralelamente, integrar datos climáticos y del entorno para evaluar cómo factores como la precipitación o la aridez influyen en la estabilidad y persistencia de estas estructuras. Este enfoque holístico no solo ayuda a validar hipótesis sobre su

formación, como la emisión de hidrógeno blanco, sino que también abre posibilidades para explorar su potencial como recurso energético natural limpio, en línea con investigaciones globales sobre fuentes de hidrógeno sostenible.



Fotografía: Manuel Zafra.

REFERENCIAS

- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2024a, 8 de agosto). Anomalías de intensidad magnética total. ANH. <https://www.anh.gov.co/en/hidrocarburos/informacion-geologica-y-geofisica/metodos-remotos/anomalias-intensidad-magnetica-total/>
- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2024b, 8 de agosto). Anomalías Bouguer total. ANH. <https://www.anh.gov.co/en/hidrocarburos/informacion-geologica-y-geofisica/metodos-remotos/anomalias-bouguer-total/>
- Aimikhe, V. J., & Eyankware, O. E. (2023). Recent Advances in White Hydrogen Exploration and Production: A Mini Review. In *Journal of Energy Research and Reviews* (Vol. 13, Issue 4, pp. 64–79). Sciencedomain International. <https://doi.org/10.9734/jenrr/2023/v13i4272>
- Aimar, L., Frery, E., Strand, J., Heath, C., Khan, S., Moretti, I., & Ong, C. (2023). Natural hydrogen seeps or salt lakes: how to make a difference? Grass Patch example, Western Australia. In *Frontiers in Earth Science* (Vol. 11). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1236673>
- Bendal, B. (2022). Current perspectives on natural hydrogen: a synopsis. *MESA Journal* 96, 37–46.
- Boreham, C. J., Edwards, D. S., Czado, K., Rollet, N., Wang, L., van der Wielen, S., Champion, D., Blewett, R., Feitz, A., & Henson, P. A. (2021). Hydrogen in Australian natural gas: occurrences, sources and resources. In *The APPEA Journal* (Vol. 61, Issue 1, p. 163). CSIRO Publishing. <https://doi.org/10.1071/aj20044>
- Carrillo Ramirez, A., Gonzalez Penagos, F., Rodriguez, G., & Moretti, I. (2023). Natural H2 Emissions in Colombian Ophiolites: First Findings. In *Geosciences* (Vol. 13, Issue 12, p. 358). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/geosciences13120358>
- Donzé, F.-V., Truche, L., Shekari Namin, P., Lefevre, N., & Bazarkina, E. F. (2020). Migration of Natural Hydrogen from Deep-Seated Sources in the São Francisco Basin, Brazil. In *Geosciences* (Vol. 10, Issue 9, p. 346). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/geosciences10090346>
- Gaucher, E. C. (2020). New Perspectives in the Industrial Exploration for Native Hydrogen. In *Elements* (Vol. 16, Issue 1, pp. 8–9). Mineralogical Society of America. <https://doi.org/10.2138/gselements.16.1.8>
- Geymond, U., Ramanaidou, E., Lévy, D., Ouaya, A., & Moretti, I. (2022). Can Weathering of Banded Iron Formations Generate Natural Hydrogen? Evidence from Australia, Brazil and South Africa. In *Minerals* (Vol. 12, Issue 2, p. 163). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/min12020163>
- Guélard, J., Beaumont, V., Rouchon, V., Guyot, F., Pillot, D., Jézéquel, D., Ader, M., Newell, K. D., & Deville, E. (2017). Natural H2 in Kansas: Deep or shallow origin? In *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* (Vol. 18, Issue 5, pp. 1841–1865). American Geophysical Union (AGU). <https://doi.org/10.1002/2016gc006544>
- Heinemann, N., Alcalde, J., Miocic, J. M., Hangx, S. J. T., Kallmeyer, J., Ostertag-Henning, C., Hassanpouryouzband, A., Thayesen, E. M., Strobel, G. J., Schmidt-Hattenberger, C., Edlmann, K., Wilkinson, M., Bentham, M., Stuart Haszeldine, R., Carbonell, R., & Rudloff, A. (2021). Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – the scientific challenges. In *Energy & Environmental Science* (Vol. 14, Issue 2, pp. 853–864). Royal Society of Chemistry (RSC). <https://doi.org/10.1039/d0ee03536j>
- INGEOMINAS, Alma Mater GPR Ltda. (2009) Geología de la Plancha 9 Uribia, Escala 1:100.000. Instituto Colombiano De Geología Y Minería - INGEOMINAS. Bogotá, Colombia. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008010024276/mapa/pdf/2105242761300003.pdf>
- Lévy, D., Roche, V., Pasquet, G., Combaudon, V., Geymond, U., Loiseau, K., & Moretti, I. (2023). Natural H2 exploration: tools and workflows to characterize a play. In *Science and Technology for Energy Transition* (Vol. 78, p. 27). EDP Sciences. <https://doi.org/10.2516/stet/2023021>
- McMahon, C. J., Roberts, J. J., Johnson, G., Edlmann, K., Flude, S., & Shipton, Z. K. (2023). Natural hydrogen seeps as analogues to inform monitoring of engineered geological hydrogen storage. In *Geological Society, London, Special Publications* (Vol. 528, Issue 1, pp. 461–489). Geological Society of London. <https://doi.org/10.1144/sp528-2022-59>
- Moretti, I., Brouilly, E., Loiseau, K., Prinzhofner, A., & Deville, E. (2021a). Hydrogen Emanations in Intracratonic Areas: New Guide Lines for Early Exploration Basin Screening. In *Geosciences* (Vol. 11, Issue 3, p. 145). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/geosciences11030145>
- Moretti, I., Prinzhofner, A., Françolin, J., Pacheco, C., Rosanne, M., Rupin, F., & Mertens, J. (2021b). Long-term monitoring of natural hydrogen superficial emissions in a brazilian cratonic environment. Sporadic large pulses versus daily periodic emissions. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 46, Issue 5, pp. 3615–3628). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.026>
- Moretti, I., Geymond, U., Pasquet, G., Aimar, L., & Rabaute, A. (2022). Natural hydrogen emanations in Namibia: Field acquisition and vegetation indexes from multispectral satellite image analysis. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 47, Issue 84, pp. 35588–35607). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.135>
- Myagkiy, A., Moretti, I., & Brunet, F. (2020). Space and time distribution of subsurface H2 concentration in so-called "fairy circles": Insight from a conceptual 2-D transport model. In *BSGF - Earth Sciences Bulletin* (Vol. 191, p. 13). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/bsgf/2020010>
- Patiño, C., Marín, M., López, A., Morales, H., Ordoñez, Y. (2023). Elementos del subsuelo que teóricamente podrían favorecer la generación, migración y acumulación de Hidrógeno Natural en diferentes cuencas de Colombia. XX Congreso Colombiano de Petróleo, Gas y Energía organizado por ACIPET en Cartagena, Colombia.
- Prinzhofner, A., Tahara Cissé, C. S., & Diallo, A. B. (2018). Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 43, Issue 42, pp. 19315–19326). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.193>
- Prinzhofner, A., Moretti, I., Françolin, J., Pacheco, C., D'Agostino, A., Werly, J., & Rupin, F. (2019). Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: The example of a Brazilian H2-emitting structure. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 44, Issue 12, pp. 5676–5685). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.119>
- Rezaee, R. (2020). Natural Hydrogen System in Western Australia? MDPI AG. <https://doi.org/10.20944/preprints202010.0589.v1>
- Saunders D.F., Burson K.R. & Thompson C.K. 1999. Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations. *A.A.P.G. Bull.* 83:170-185. <https://doi.org/10.1306/00AA9A34-1730-11D7-8645000102C1865D>
- SGC - Servicio Geológico Colombiano. (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa Escala 1: 25.000. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- Souza Filho, Carlos & Augusto, V.A. & Oliveira, Wilson & Lammoglia, Talita. (2008). Detecção de exsudações de hidrocarbonetos por geobatônica e sensoriamento remoto multi-temporal: estudo de caso no Remanso do Fogo (MG). *Revista Brasileira de Geociências*. 38. 228-243.
- Vacquand, C., Deville, E., Beaumont, V., Guyot, F., Sissmann, O., Pillot, D., Arcilla, C., & Prinzhofner, A. (2018). Reduced gas seepages in ophiolitic complexes: Evidences for multiple origins of the H2-CH4-N2 gas mixtures. In *Geochimica et Cosmochimica Acta* (Vol. 223, pp. 437–461). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.12.018>
- Zgonnik, V., Beaumont, V., Larin, N., Pillot, D., & Deville, E. (2019). Diffused flow of molecular hydrogen through the Western Hajar mountains, Northern Oman. In *Arabian Journal of Geosciences* (Vol. 12, Issue 3). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4242-2>
- Zgonnik, V. (2020). The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 203, p. 103140). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140>
- Zuluaga, C., Ochoa, A., Muñoz, C., Dorado, C., Guerrero, N., Martinez, A., Medina, P., Ocampo, E., Pinilla, A., Rios, P., Rodríguez, B., Salazar, E., Zapata, V. (2008a) Geología de la Plancha 2 Puerto Bolívar, Escala 1:100.000. Instituto Colombiano De Geología Y Minería - INGEOMINAS. Bogotá, Colombia. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008010024231/mapa/pdf/2105242311300002.pdf>
- Zuluaga, C., Ochoa, A., Muñoz, C., Dorado, C., Guerrero, N., Martinez, A., Medina, P., Ocampo, E., Pinilla, A., Rios, P., Rodríguez, B., Salazar, E., Zapata, V. (2008b) Geología de la Plancha 3 Puerto Estrella, Escala 1:100.000. Instituto Colombiano De Geología Y Minería - INGEOMINAS. Bogotá, Colombia. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008010024231/mapa/pdf/2105242311300004.pdf>
- Zuluaga, C., Ochoa, A., Muñoz, C., Dorado, C., Guerrero, N., Martinez, A., Medina, P., Ocampo, E., Pinilla, A., Rios, P., Rodríguez, B., Salazar, E., Zapata, V. (2008c) Geología de la Plancha 4 Cardón, Escala 1:100.000. Instituto Colombiano De Geología Y Minería - INGEOMINAS. Bogotá, Colombia. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008010024231/mapa/pdf/2105242311300006.pdf>
- Zuluaga, C., Ochoa, A., Muñoz, C., Dorado, C., Guerrero, N., Martinez, A., Medina, P., Ocampo, E., Pinilla, A., Rios, P., Rodríguez, B., Salazar, E., Zapata, V. (2008d) Geología de la Plancha 5 Bahía Portete, Escala 1:100.000. Instituto Colombiano De Geología Y Minería - INGEOMINAS. Bogotá, Colombia. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008010024231/mapa/pdf/2105242311300008.pdf>
- Zuluaga, C., Ochoa, A., Muñoz, C., Dorado, C., Guerrero, N., Martinez, A., Medina, P., Ocampo, E., Pinilla, A., Rios, P., Rodríguez, B., Salazar, E., Zapata, V. (2008e) Geología de la Plancha 6 Castilletes, Escala 1:100.000. Instituto Colombiano De Geología Y Minería - INGEOMINAS. Bogotá, Colombia. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008010024231/mapa/pdf/2105242311300010.pdf>
- Zuluaga, C., Ochoa, A., Muñoz, C., Dorado, C., Guerrero, N., Martinez, A., Medina, P., Ocampo, E., Pinilla, A., Rios, P., Rodríguez, B., Salazar, E., Zapata, V. (2008f) Geología de la Plancha 10 Rancho Grande, Escala 1:100.000. Instituto Colombiano De Geología Y Minería - INGEOMINAS. Bogotá, Colombia. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008010024231/mapa/pdf/2105242311300012.pdf>
- Zuluaga, C., Ochoa, A., Muñoz, C., Dorado, C., Guerrero, N., Martinez, A., Medina, P., Ocampo, E., Pinilla, A., Rios, P., Rodríguez, B., Salazar, E., Zapata, V. (2008g) Geología de la Plancha 10Bis Rancho Grande, Escala 1:100.000. Instituto Colombiano De Geología Y Minería - INGEOMINAS. Bogotá, Colombia. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008010024231/mapa/pdf/2105242311300014.pdf>

