

H₂

ATLAS

DE AREAS DE INTERÉS PARA
LA EXPLORACIÓN DE H₂ EN
EL OCCIDENTE DE COLOMBIA



Uptc[®]
Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia

ANH 
AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS

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 3:

Héctor Mora Páez

Equipo de trabajo:

Carlos Rojas, Claudia Johana Chiquillo, Claudia Patricia Cifuentes, Efrain Andres Laverde, Jaime Andrés Jimenez, Jairo Alonso Perez, Juan Diego Padilla Cortes, Juliana Andrea Fonseca Coronado, Lorena Becerra.

Fotografía:

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

REFERENCIAS

68-70 >>

1. INTRODUCCIÓN



Figura 1. Imagen sentinel 2. Tomado de onda-dias.eu.

La Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) han desarrollado el estudio denominado Subproyecto 3 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 geobotánica e inventario y análisis de estructuras de tipo Fairy Circles a partir de sensores remotos aplicados a exploración de hidrógeno natural en el Occidente de Colombia".

Este subproyecto se realizó bajo el marco del contrato interadministrativo 419 de 2014 suscrito entre las dos entidades, cuyos resultados son presentados en el presente Atlas para conocimiento de la comunidad científica y académica, además se servir como referente en las iniciativas en la transición energética del país.

Los productos derivados de sensores remotos han venido ampliando su espectro de aplicaciones en diversas disciplinas y variados propósitos, permitiendo la obtención de variables asociadas a la dinámica de la Tierra. Además del incremento en el uso de productos comerciales obtenidos con plataformas satelitales o vehículos aéreos no tripulados, uno de los factores que ha facilitado el surgimiento de nuevas aplicaciones es la iniciativa de "datos abiertos", la cual pone a disposición de los diversos tipos de usuarios, imágenes adquiridas con varios tipos de plataformas satelitales, en lo transcurrido del presente siglo, las cuales pueden ser descargas de manera gratuita.

Una de las innumerables aplicaciones corresponde a la utilización de imágenes de satélite, tanto de sensores multiespectrales como hiperspectrales y térmicos para la exploración de hidrógeno natural, con el fin de identificar y facilitar la posterior exploración de áreas potenciales para establecer las características y evaluación de condiciones para la explotación de esta fuente energética, lo cual constituye el propósito esencial del subproyecto 3. El análisis conjunto de la información derivada de las imágenes para la identificación de formas geométricas superficiales y estructuras geológicas, junto con las evaluaciones litológicas y geobotánicas permiten establecer las condiciones favorables para encontrar dichas zonas potenciales.

Los productos cartográficos incluidos en este Atlas, en formatos tanto vectorial como raster, están expresados en coordenadas geográficas basadas en el datum Magna-Sirgas como sistema de referencia del país.



2. MARCO DE REFERENCIA CONCEPTUAL

2.1 Hidrógeno Natural

El hidrógeno es el elemento químico más ligero y abundante que existe en el universo. Es un gas incoloro, inodoro e insípido, altamente inflamable, que se encuentra de forma molecular como H₂. El hidrógeno natural, también conocido como hidrógeno blanco, se encuentra de forma libre en la corteza terrestre, y es diferente al hidrógeno que se produce industrialmente mediante procesos químicos o al producido por electrólisis del agua.

Por su alta densidad energética y la posibilidad de ser producido sin causar emisiones de carbono, el hidrógeno natural es una fuente potencial de energía, fundamental en el concepto y significado actual de la transición hacia los sistemas energéticos sostenibles.

Es una fuente de energía limpia con bajas emisiones de carbono, y es una solución que puede reemplazar al gas y petróleo en diversos usos industriales y de transporte.

A nivel global, se han detectado manifestaciones de hidrógeno natural, con concentraciones superiores al 10% por volumen, en diversos tipos de ambientes, tales como cuencas carboníferas, zonas de fallas, campos hidrocarbúricos, rocas ígneas, géiseres, aguas termales, kimberlitas, cuerpos cupríferos, rocas precámbricas, depósitos salinos, rocas sedimentarias y metamórficas, acuíferos, zonas de serpentización y volcánicas (Zgonnik, 2020), Figura 2.

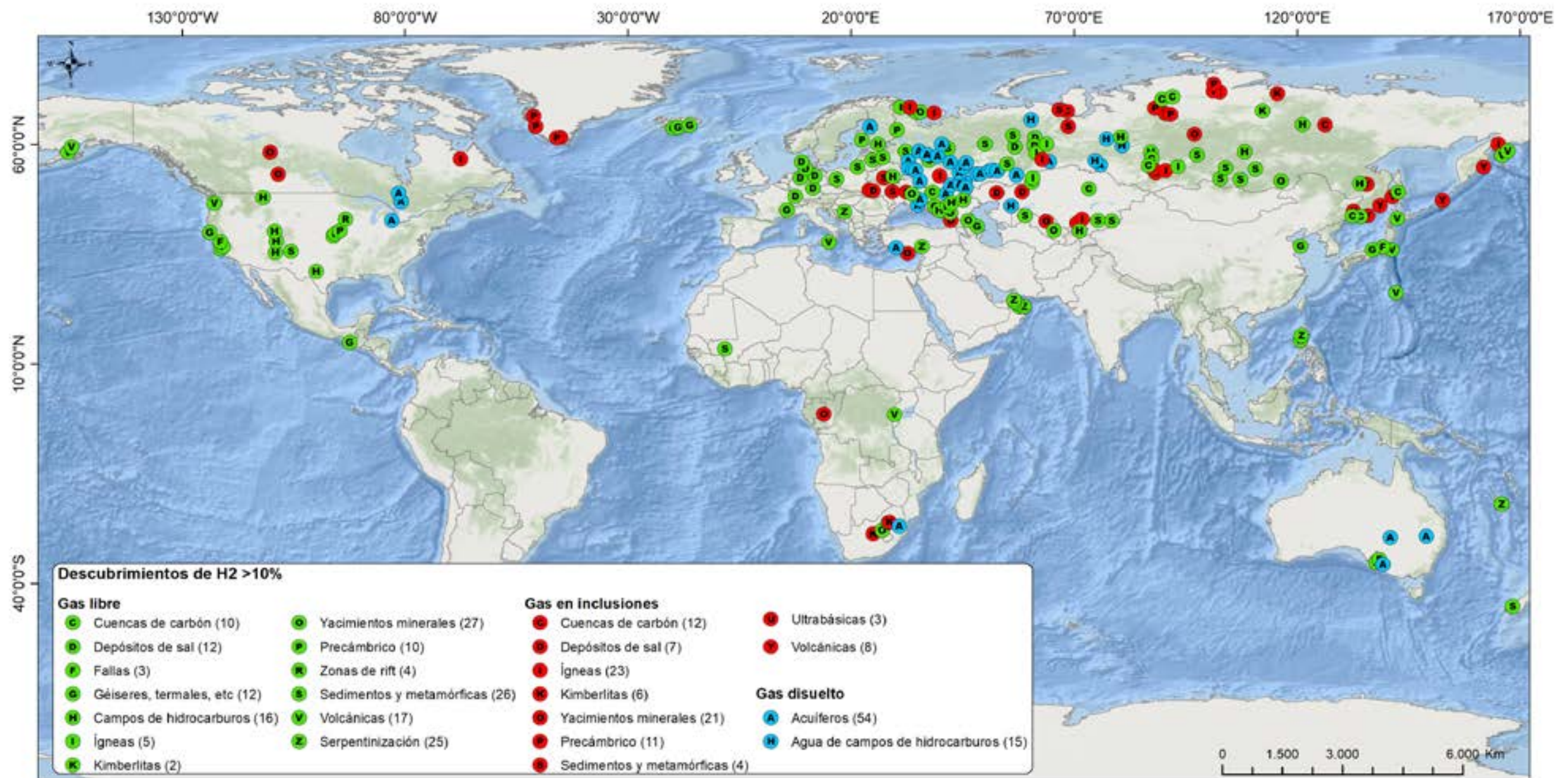


Figura 2. Mapa de detección de hidrógeno en varios ambientes de concentración mayores a 10% por volumen. Modificado de Zgonnik (2020).

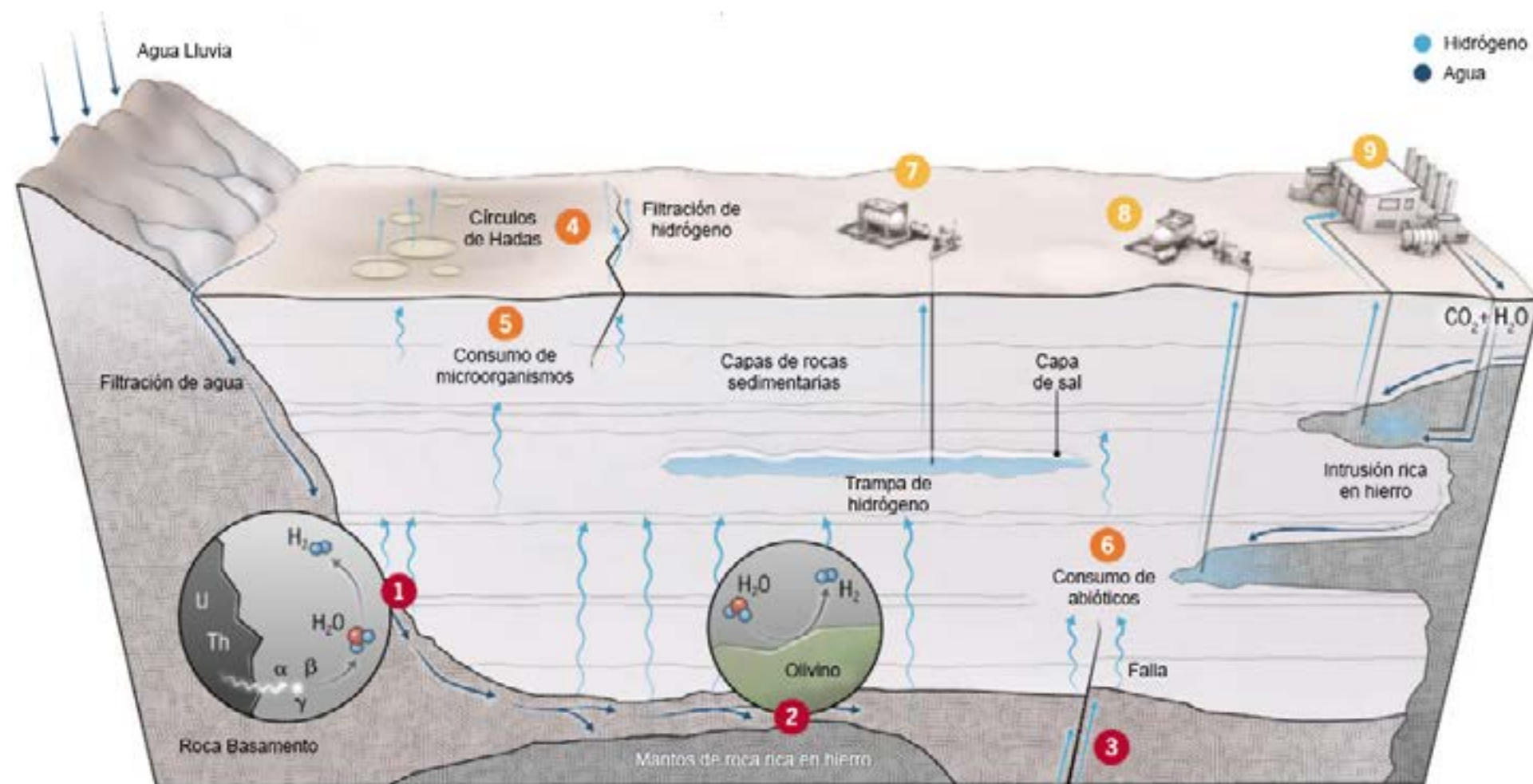


Figura 3. Fábricas de hidrógeno en la Tierra. Generación: 1. Radiólisis, 2. Serpentinización, 3. Profundo. Mecanismos de pérdida: 4. Filtraciones, 5. Microbios, Reacciones abióticas. Extracción: 7. Trampas, 8. Directa, 9. Mejorada. Modificado de Hand, (2023).

Hand (2023) señala que las fábricas de hidrógeno natural en la Tierra se pueden circunscribir a tres componentes principales: generación de hidrógeno, mecanismos de pérdida y extracción. En el caso de la generación, propone tres escenarios fundamentales: radiólisis, que corresponde a la desintegración radiactiva natural que divide las moléculas de agua y genera H_2 radiolítico, que depende de las proporciones relativas de Potasio, Uranio y Torio, y la relación entre agua-roca, entre otros; serpentinización, en que el agua reacciona con rocas del manto ricas en hierro que contienen olivino y ortopiroxeno para formar gas hidrógeno y minerales en los que predomina la serpentina; y en profundidad, donde las corrientes de hidrógeno provenientes del núcleo o manto de la Tierra se desplazan hacia la superficie en los límites de placas tectónicas y fallas geológicas, Figura 3.

De igual manera, describe tres mecanismos de pérdida, a saber: filtraciones, debido a que el hidrógeno viaja rápidamente a través de fallas y fracturas, pudiéndose además propagarse a través de las rocas. Las filtraciones débiles y acumulaciones de hidrógeno en el subsuelo se expresan en superficie como depresiones de geometría circular en el terreno, conocidas como "círculos de hadas" (fairy circles), que se pueden asociar a anomalías en la vegetación y alteraciones en el suelo, las cuales pueden presentarse de

manera agrupada, con tamaños variables, a lo cual corresponde este proyecto. Microbios, los cuales consumen hidrógeno en las capas superficiales de suelos y rocas, para obtener energía, generando metano, y; reacciones abióticas, cuando el hidrógeno, en niveles más profundos, reacciona con rocas y gases para generar agua, metano y minerales compuestos, Figura 3.

Finalmente, indica tres formas de extracción: trampas, pudiéndose extraer el hidrógeno como se hace con el petróleo y el gas, mediante perforación de reservorios atrapados en rocas porosas por debajo de depósitos de sal u otras capas de rocas impermeables; directa, que sería aprovechar las fuentes ricas en hierro directamente, y si son poco profundas y fracturadas, obtener el hidrógeno; y, mejorada, cuya producción de hidrógeno se estimularía mediante el bombeo de agua en rocas ricas en hierro, Figura 3.

Las emanaciones reportadas en diversos lugares del mundo de hidrógeno en superficie y su presencia en el subsuelo pueden ser interpretadas como evidencias de la ocurrencia de procesos formadores de hidrógeno natural, potenciales reservas económicas que se constituye en un campo de acción nuevo en Colombia orientado a la exploración y potencial explotación del hidrógeno natural.

2.2. Sensoramiento remoto o teledetección

Sensoramiento remoto, también conocido como teledetección, es definido como la adquisición de información de un objeto, área o fenómeno sin que exista contacto físico con el objeto, área o fenómeno a ser estudiado (Lillesand, Kiefer & Chipman, 2004; Egachi & van Zil, 2021). Así, la observación de la Tierra mediante sensores remotos se basa en el análisis e interpretación de las mediciones de la radiación electromagnética (EMR, de sus siglas en inglés) reflejada, emitida o absorbida por los objetos en la superficie de la Tierra, océano y capas de hielo, así como en la atmósfera, empleando tecnologías basadas en instrumentos dispuestos en aeronaves o satélite, lo cual permite establecer la relación entre estas mediciones y la naturaleza y distribución de los objetos y fenómenos en la superficie terrestre o en la atmósfera (Mather & Koch, 2011).

La interacción entre el objeto y la energía electromagnética como la luz, calor y microondas es determinada por las propiedades físicas del objeto y la longitud de onda de la energía electromagnética que es obtenida de forma remota (Sabins & Ellis, 2020).

Dichas observaciones, aéreas o espaciales, son basadas en la radiación electromagnética, la cual puede ser generada por una fuente de energía natural como el sol, en cuyo caso se conocen como sistemas de sensores remotos pasivos, o generada por el instrumento a bordo, lo cual es conocido como sensoramiento remoto activo (Rees, 2006), Figura 4.

La energía generada por la fuente respectiva se refleja en la superficie terrestre y después de atravesar la atmósfera, es captada por los sensores ubicados en diferentes tipos de plataformas.

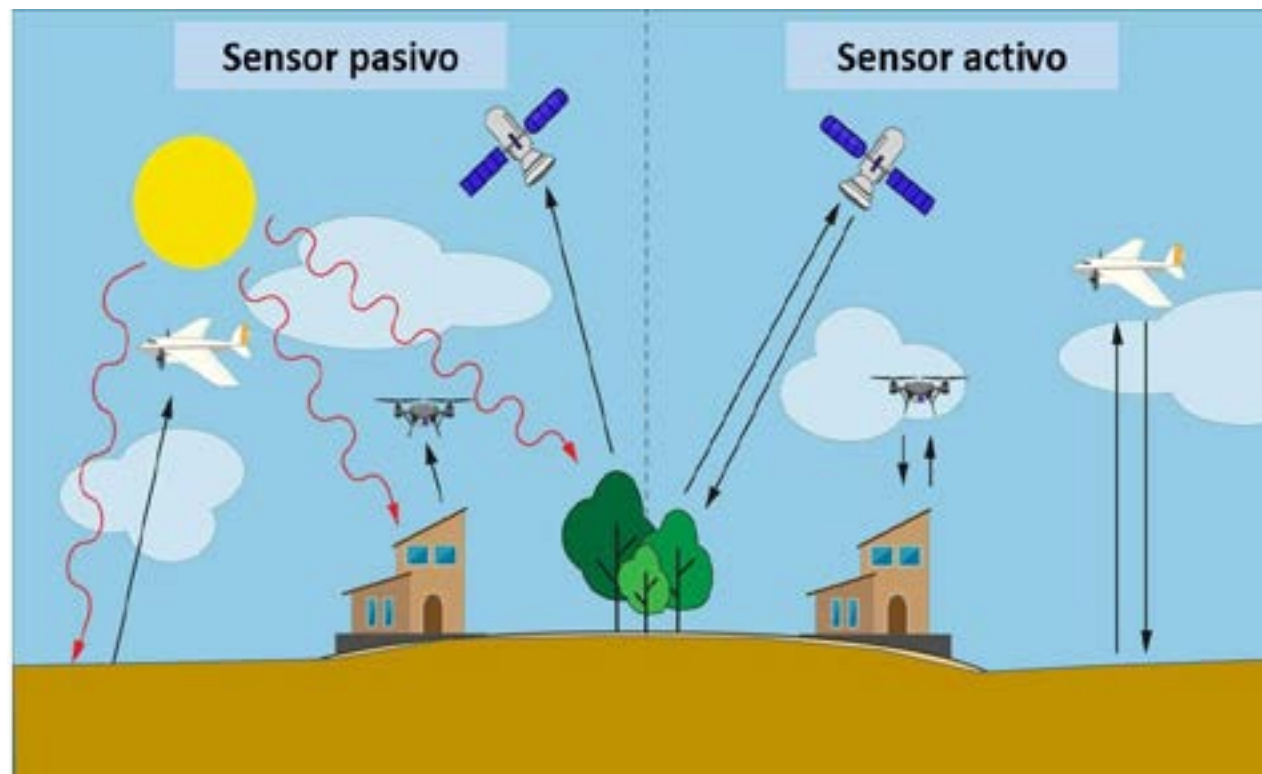


Figura 4. Sistemas de sensoramiento remoto: pasivo (A) y activo (B). Modificado de Adamo et al., (2021).

En sensoramiento remoto, es preciso tener en cuenta tres elementos esenciales: primero, la adquisición de las imágenes y datos asociados mediante el empleo de tecnologías tales como los sistemas electro-ópticos o sistemas tipo escaner o de barrido; segundo, el procesamiento, que hace referencia al procedimiento digital que convierte los datos "brutos" en imágenes; y tercero, probablemente la etapa más importante, que corresponde al análisis e interpretación, que permite convertir la información asociada a las imágenes para la generación de otra forma de información tales como mapas de uso o cobertura del suelo, prospectos de hidrocarburos, minerales y otros, asociados a específicas aplicaciones dependiendo de los propósitos particulares y variables a ser consideradas en los respectivos estudios (Sabins & Ellis, 2020).

La luz visible, las ondas de radio, calor, rayos ultravioleta y rayos X son formas de energía electromagnética, la cual es irradiada de acuerdo con la teoría ondulatoria básica.

Una onda electromagnética es compleja, y está compuesta por vectores de campos eléctricos y magnéticos mutuamente ortogonales. La onda, de forma armónica y sinusoidal, se propaga a la velocidad de la luz, Figura 5.

La separación entre los picos de onda se conoce como longitud de onda y el número de picos que pasan por un punto fijo en el espacio por unidad de tiempo es denominada la frecuencia.

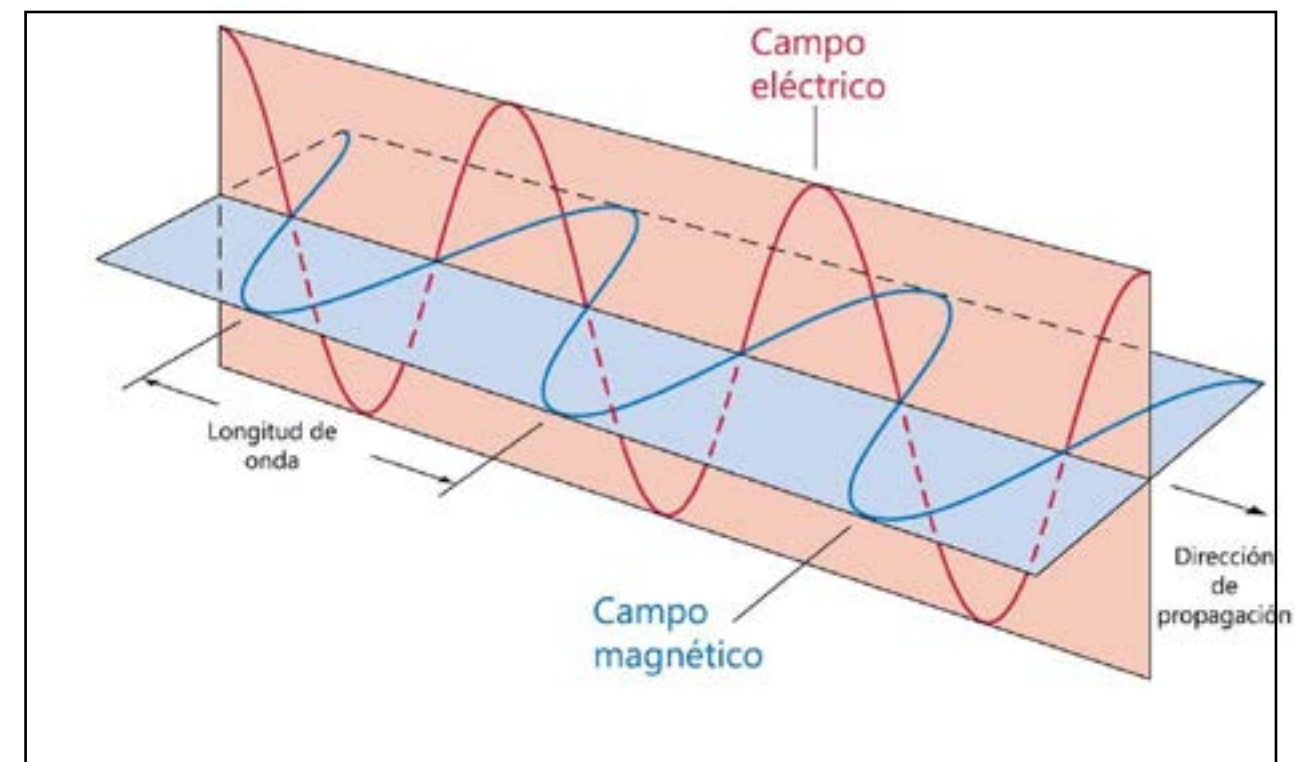


Figura 5. Elementos de una onda electromagnética. Tomado de <https://nuevaescuelamexicana.org>

Una forma de clasificar la radiación electromagnética es mediante el concepto del espectro electromagnético, que permite establecer los rangos de las longitudes de onda y frecuencias, Figura 6, principio fundamental en sensoramiento remoto para obtener información de las características de la superficie de la Tierra a distancia, empleando las propiedades de las ondas electromagnéticas emitidas, reflejadas o difractadas por los objetos detectados.

Los sensores que captan dicha información se encuentran ubicados en diversos tipos de plataformas, tales como satélites, aviones o vehículos aéreos no tripulados. Así, en el espectro electromagnético se encuentran rangos diferentes tales como la zona visible, correspondiente a la radiación electromagnética que el ojo humano puede percibir; el infrarrojo cercano (NIR), importante para discriminar cubiertas vegetales, que generalmente tienen valores altos de reflectancia en este intervalo del espectro; el infrarrojo medio (MIR), de gran utilidad para la estimación de contenidos de humedad en la vegetación y para la detección de focos de temperatura; el infrarrojo térmico (TIR), que detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres; y las micro-ondas, con la característica especial de ser un tipo de radiación que no es afectada sustancialmente por las cubiertas de nubes.

La incorporación e integración de tecnologías innovadoras han permitido avances significativos así como el surgimiento de otras aplicaciones tales como el desarrollo de sensores de alta resolución, vehículos no tripulados y autónomos, así como sensores hiperspectrales, entre otros.

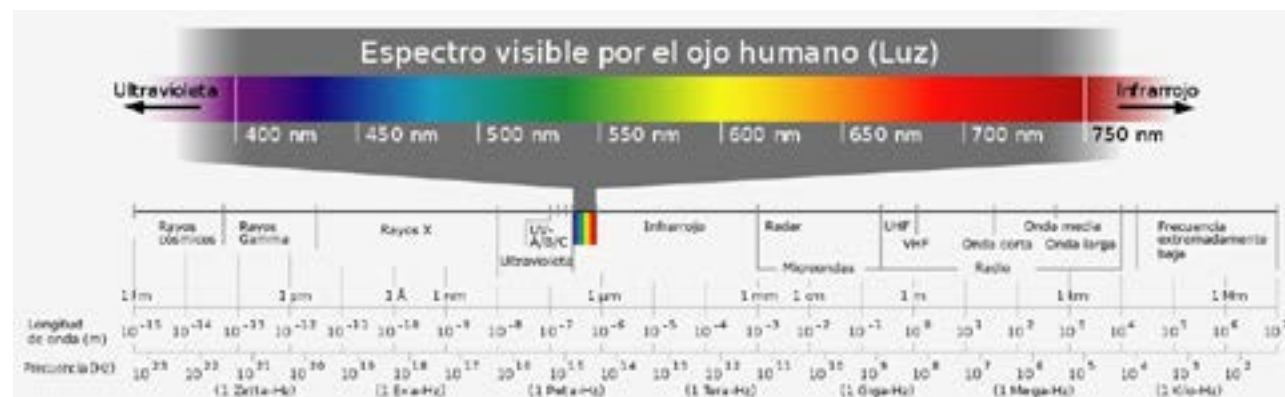


Figura 6. El espectro electromagnético y el sensoramiento remoto. Tomado de <https://mappinggis.com>

La imagen obtenida en el sensor ubicado en la plataforma respectiva transforma los diversos niveles de radiancia, procedentes de la superficie terrestre, en valores numéricos conocidos como niveles digitales.

Los materiales ubicados sobre la superficie terrestre reflejan y absorben las ondas de la radiación electromagnética en diferentes longitudes de onda. Cuando la cantidad de radiación electromagnética, normalmente la intensidad de radiación reflejada, o reflectancia expresada en porcentaje, proveniente del material sobre la superficie terrestre es representada en un rango de longitudes de onda, se genera una curva que es conocida como la firma espectral.

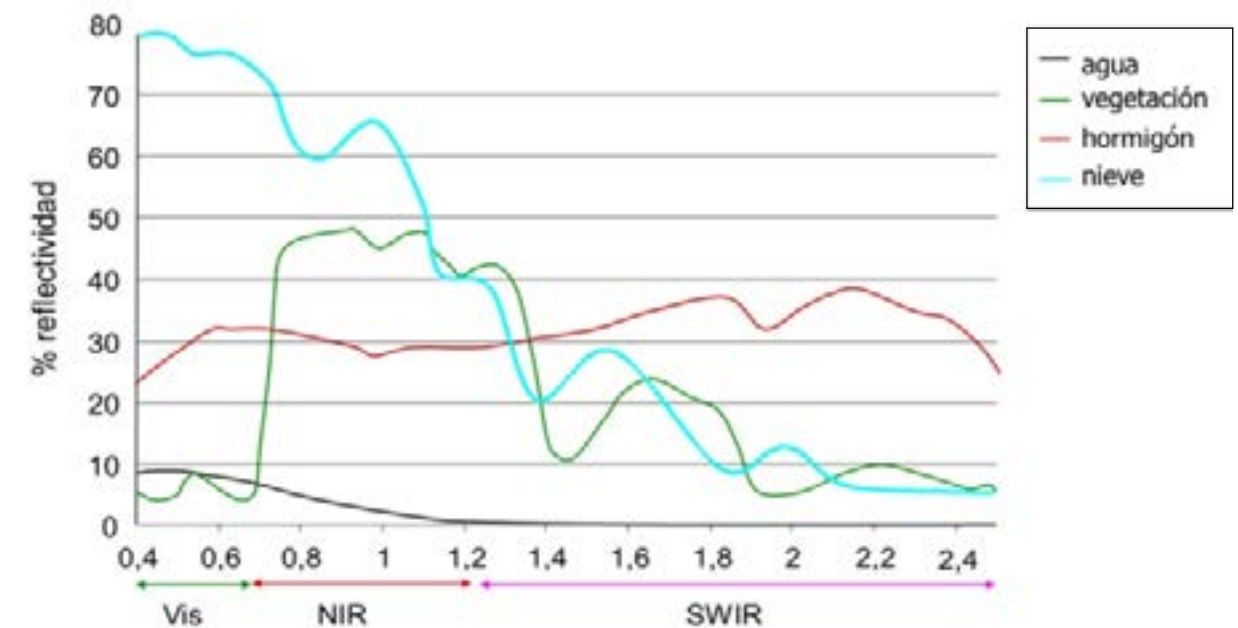


Figura 7. Firmas espectrales de algunas cubiertas de la superficie terrestre. Tomado del Instituto Geográfico Nacional de España (<https://pnt.ign.es/firmas-espectrales>)

La superficie terrestre está compuesta por un conjunto heterogéneo de cubiertas que responden a un diferente comportamiento espectral. Cada material, cada sustancia, emiten energía electromagnética de forma distinta, y por tanto cada uno tendrá una firma espectral característica que lo identifica.

La Figura 7, indica las firmas espectrales de cuatro tipos de cubiertas en la superficie terrestre: agua, vegetación sana, hormigón y nieve.

Las variables correspondientes a la superficie son características de la superficie terrestre, físicas o biológicas, que se pueden estimar mediante observaciones empleando imágenes de satélite y métodos propios de la teledetección, o por observación directa y toma de datos en campo. Estas variables, que corresponden a propiedades medibles de la superficie terrestre directamente asociadas a aspectos tales como cobertura, uso y humedad del suelo, temperatura de la superficie, rugosidad del terreno, entre otras, permiten analizar diversas condiciones y fenómenos asociados a la dinámica propia de la Tierra, y realizar estudios con diversos propósitos.

Para ello se emplean diversos tipos de imágenes, y entre ellas, las imágenes multiespectrales, hiperspectrales y térmicas, que permiten identificar variables empleando metodologías apropiadas, establecer el estado de la vegetación para analizar e identificar rasgos geométricos conocidos como círculo de hadas, así como estimar la temperatura del suelo y determinar anomalías que puedan estar asociadas a manifestaciones de hidrógeno natural. Así, la aplicación de productos de sensores remotos para identificar zonas potenciales en la exploración de hidrógeno natural es un campo de estudio emergente que permite realizar el análisis combinado de datos geológicos, geoquímicos o geofísicos.

Al emplear diversos tipos de imágenes de satélite, se obtiene información útil acerca de las características geológicas de las zonas de interés, el estado del suelo y de la vegetación y su relación con la posible presencia de emisiones de gas natural.

Los diferentes tipos de imágenes utilizadas con este propósito son imágenes multiespectrales, hiperespectrales y térmicas, que permiten por un lado, identificar variables, empleando metodologías apropiadas para establecer el estado de la vegetación para el análisis e identificación de rasgos geométricos conocidos como círculo de hadas (fairy circles), y por otro lado, estimar la temperatura del suelo y así determinar anomalías que puedan estar asociadas a manifestaciones de hidrógeno natural.

Las variables correspondientes a la superficie son características de la superficie terrestre, físicas o biológicas, que se pueden estimar mediante observaciones empleando imágenes de satélite y métodos propios de la teledetección, o por observación directa y toma de datos en campo.

Estas variables, que corresponden a propiedades medibles de la superficie terrestre directamente asociadas a aspectos tales como cobertura, uso y humedad del suelo, temperatura de la superficie, rugosidad del terreno, entre otras, permiten analizar diversas condiciones y fenómenos asociados a la dinámica propia de la Tierra, y realizar estudios con diversos propósitos.

Para ello se emplean diversos tipos de imágenes, y entre ellas, las imágenes multiespectrales, hiperespectrales y térmicas, que permiten identificar variables empleando metodologías apropiadas, establecer el estado de la vegetación para analizar e identificar rasgos geométricos conocidos como círculo de hadas, así como estimar la temperatura del suelo y determinar anomalías que puedan estar asociadas a manifestaciones de hidrógeno natural.

Así, la aplicación de productos de sensores remotos para identificar zonas potenciales en la exploración de hidrógeno natural es un campo de estudio emergente que permite realizar el análisis combinado de datos geológicos, geoquímicos o geofísicos.

Al emplear diversos tipos de imágenes de satélite, se obtiene información útil acerca de las características geológicas de las zonas de interés, el estado del suelo y de la vegetación y su relación con la posible presencia de emisiones de gas natural.

2.3. Imágenes de satélite empleadas en el subproyecto 3

Para alcanzar los propósitos establecidos en el subproyecto 3 se emplearon diversos tipos de imágenes. A continuación, a manera de ilustración, se muestran algunas imágenes correspondientes a la zona del proyecto, las cuales constituyen el insumo fundamental para el procesamiento y análisis e interpretación posterior.

2.3.1 Programa Landsat

Landsat es un programa conjunto entre la agencia espacial NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (NASA) que ofrece un catálogo amplio de observaciones de la

Tierra a nivel global, que desde 1972 ha venido adquiriendo imágenes de la superficie de la Tierra, suministrando datos para el estudio de los recursos naturales y el ambiente.

A la fecha se han lanzado nueve misiones satelitales bajo el marco de este programa, y se tiene programada la nueva misión para el año 2030.

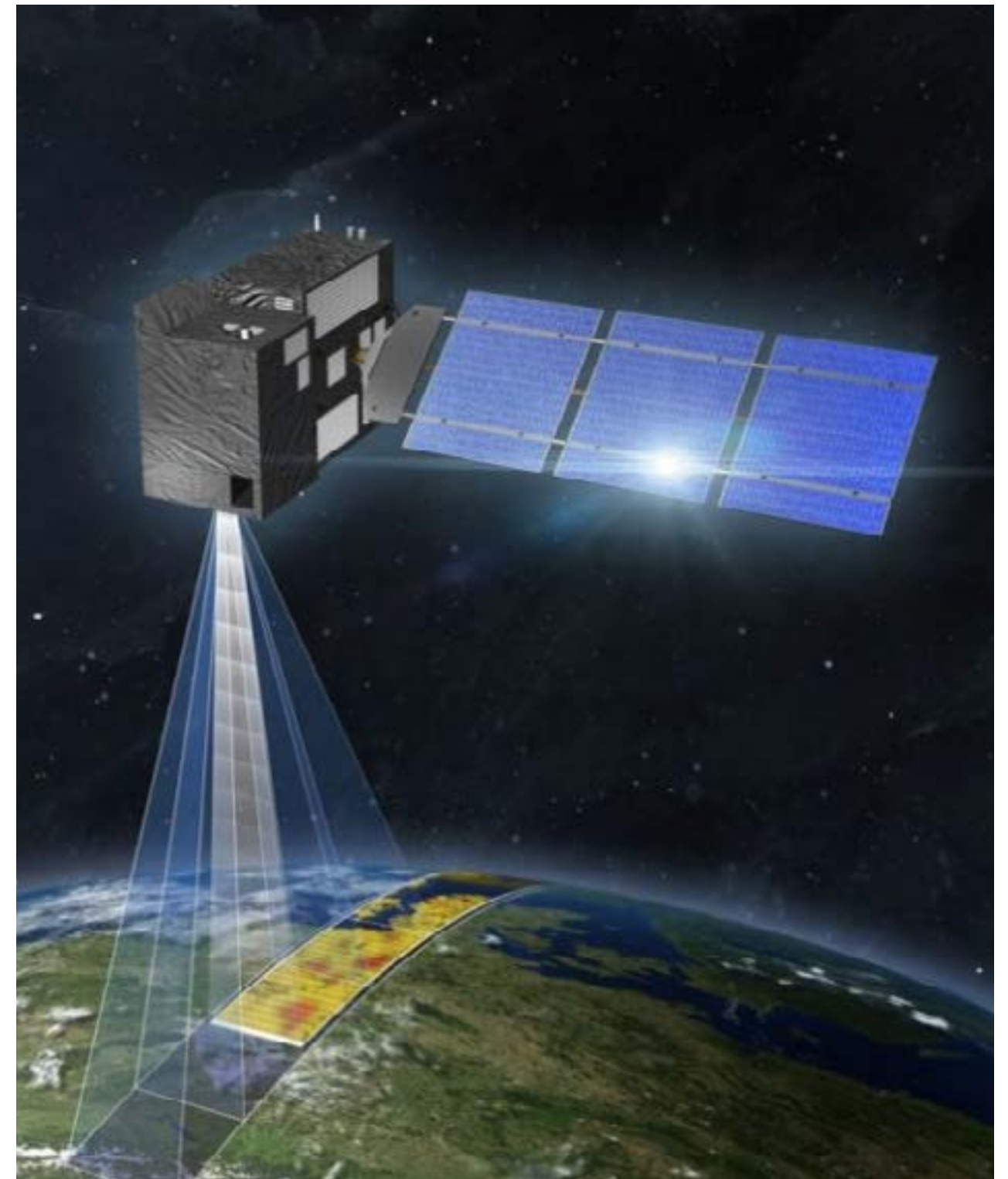


Figura 8. Infografía de satélite de Observación de la Tierra y toma de imágenes
Fuente: <https://www.4earthintelligence.com/insights/do-you-need-satellite-imagery/>

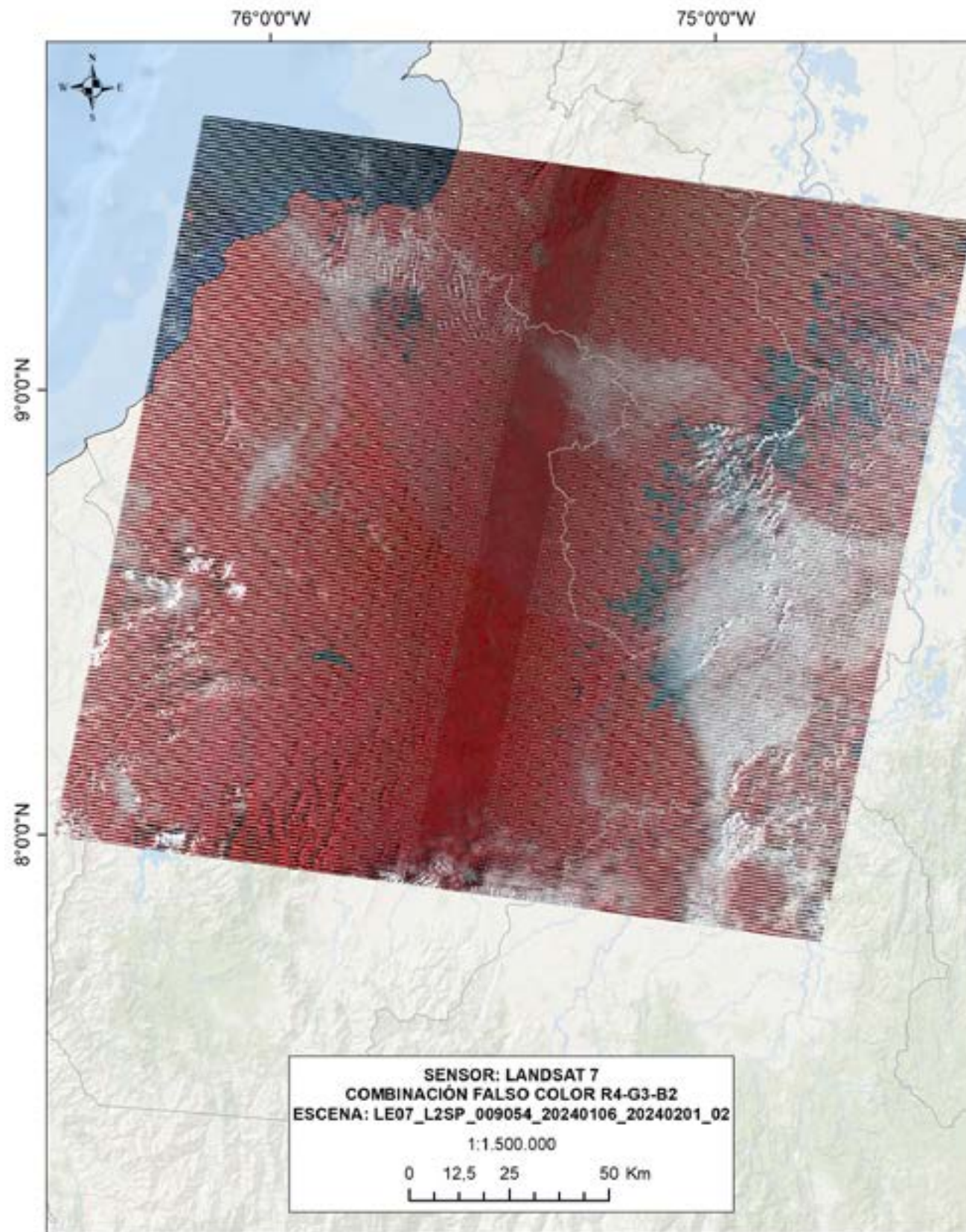


Figura 9. Producto de Landsat-7 en la zona del subproyecto 3 correspondiente a imagen falso color obtenida mediante la combinación de bandas que permite resaltar características que son invisibles o muy poco visibles para el ojo humano.

Landsat 7.

El satélite Landsat 7, lanzado en abril de 1999, adquirió datos científicos hasta enero de 2024. Introdujo el sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), con resolución de 30 metros mejorando el alcance de sus predecesores Landsat 4 y 5, y una banda pancromática de resolución de 15 metros. Su principal objetivo es la adquisición de imágenes multispectrales de alta calidad para monitorear la superficie terrestre, contribuyendo a estudios sobre el cambio climático, la gestión de recursos naturales, y la cartografía global.

El satélite está equipado con un sensor llamado Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), que continúa y mejora la misión de sus predecesores, Landsat 4 y 5. El sensor ETM contiene ocho bandas espectrales, incluyendo una banda pancromática y una banda termal. Como características principales permite capturar imágenes en el espectro visible; evaluar la vegetación y el contenido de humedad en el infrarrojo cercano; estimar la temperatura de la superficie terrestre en infrarrojo térmico; ayudar en la detección de humedad del suelo, rocas y minerales en el infrarrojo de onda corta; y mejorar los estudios detallados mediante la banda pancromática de resolución de 15 metros.

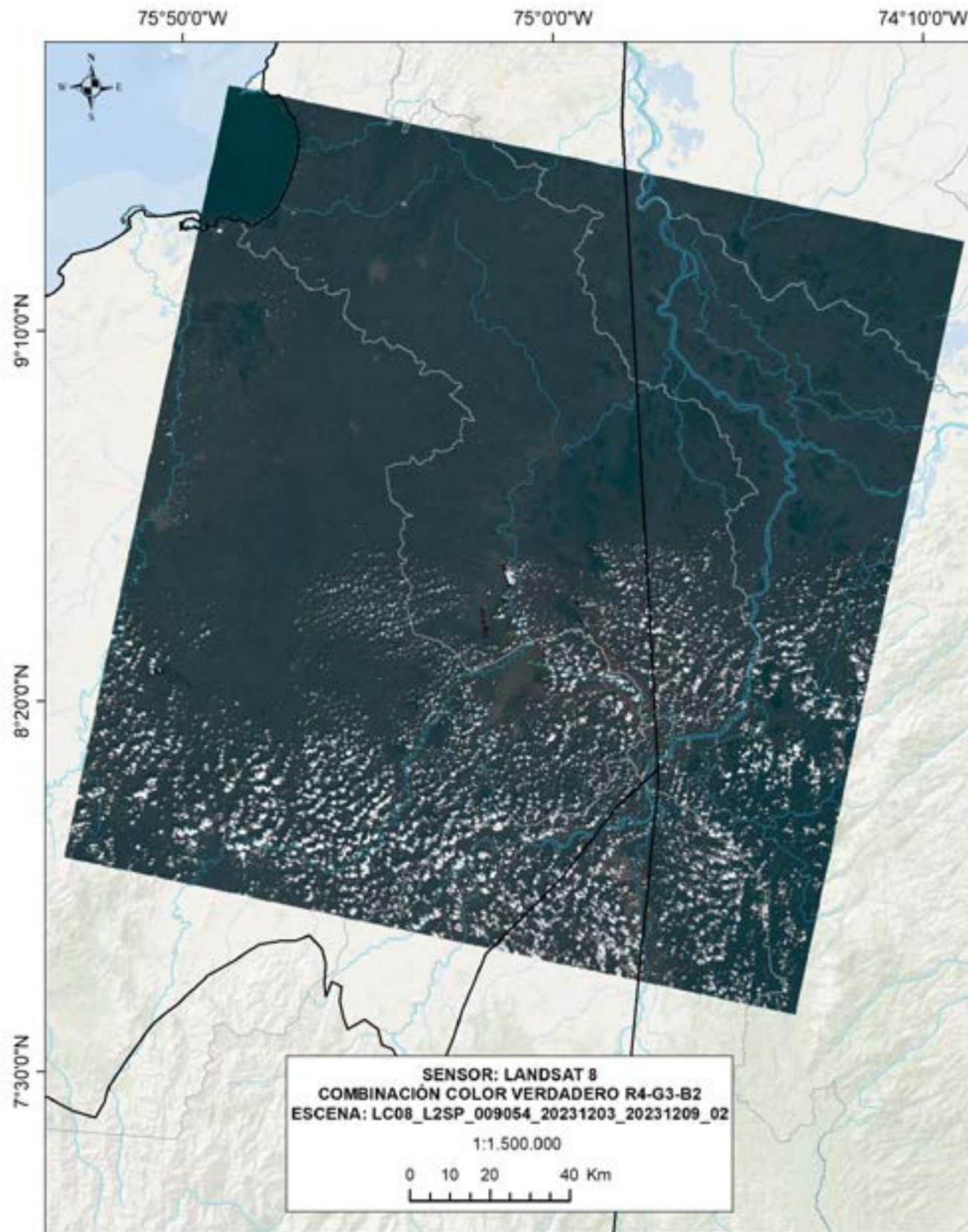


Figura 10. Producto de Landsat-8 en la zona del subproyecto 3 correspondiente a imagen de color verdadero obtenida mediante la combinación de bandas

Landsat 8

El satélite Landsat-8 fue lanzado en febrero de 2013, y lleva dos instrumentos denominados OLI (Operational Land Imager) y TIRS (Thermal Infrarrojo Sensor) que permite la obtención de datos en 11 bandas espectrales.

OLI mide en las porciones visible, infrarroja cercana e infrarroja de onda corta (VNIR, NIR y SWIR) del espectro, mientras que TIRS mide la temperatura de la superficie terrestre en dos bandas térmicas con una tecnología que aplica la física cuántica para detectar el calor. Las imágenes del Landsat 8 tienen resoluciones espaciales pancromáticas de 15 metros y multiespectrales de 30 metros a lo largo de una franja de 185 km.

Las bandas espectrales del sensor OLI son similares al sensor Landsat 7 ETM+, con una mejora instrumental respecto a las misiones Landsat anteriores al incorporar dos nuevas bandas espectrales. Tiene un canal profundo en el azul visible (banda 1), diseñado específicamente para los recursos hídricos e investigación en zonas costeras, y un nuevo canal infrarrojo (banda 9) para la detección de nubes cirrus. También se incluye una nueva banda de control de calidad, proporcionando información más detallada sobre la presencia de características tales como las nubes, agua y nieve. El sensor TIRS recoge dos bandas espectrales en longitudes de onda incluidas por la misma banda en los anteriores sensores TM y ETM+.

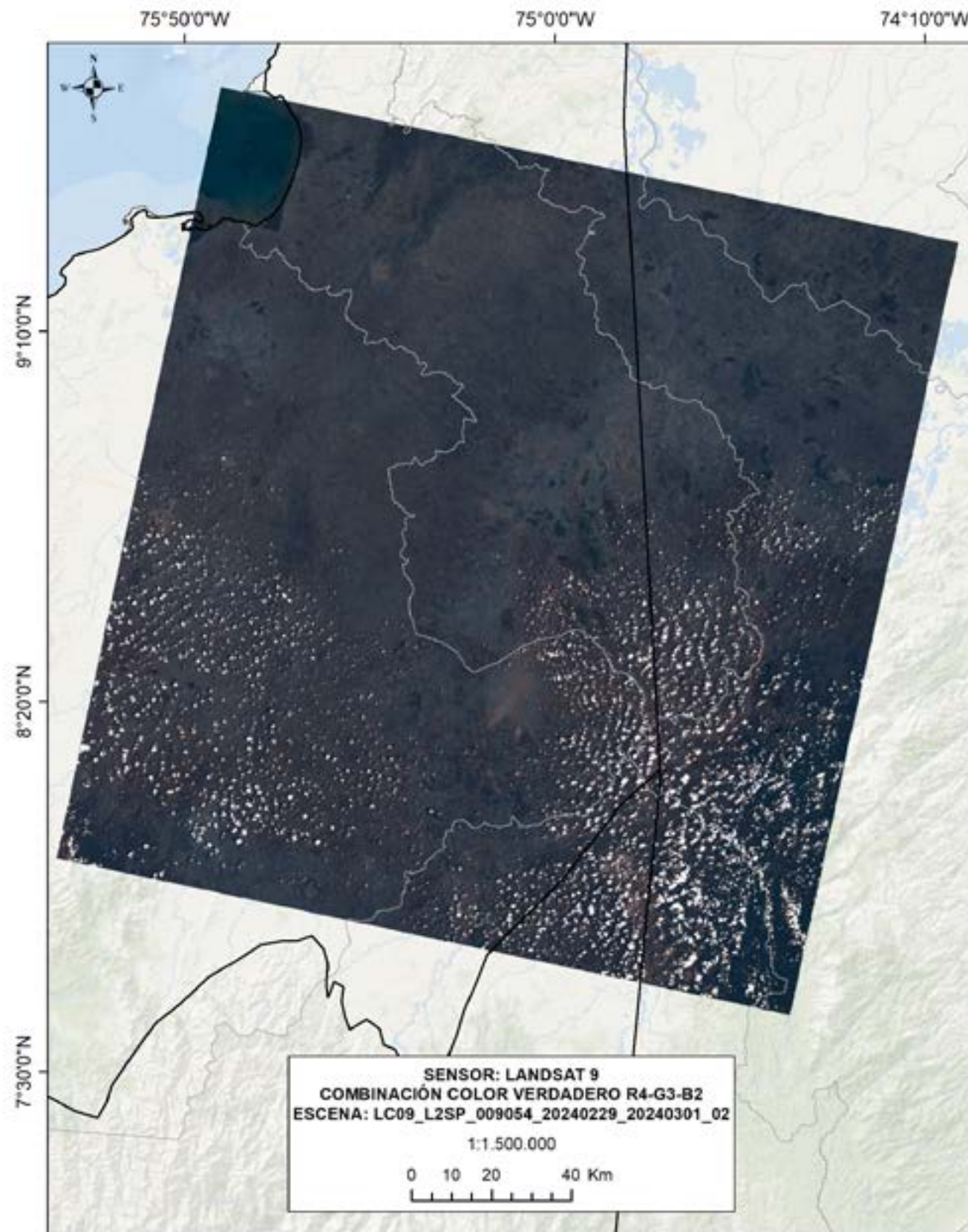


Figura 11. Producto de Landsat-9 en la zona del subproyecto 3 correspondiente a imagen de color verdadero obtenida mediante la combinación de las bandas correspondientes.

Landsat 9

El satélite Landsat-9 se lanzó en septiembre de 2021, y lleva los sensores OLI-2 (Operational Land Imager 2) y TIRS-2 (Thermal Infrared Sensor 2), que comprende 11 bandas espectrales que abarcan desde el espectro visible hasta el infrarrojo cercano y térmico. El OLI-2 captura observaciones de la superficie de la Tierra en bandas visibles, infrarrojas cercanas e infrarrojas de onda corta, y TIRS-2 mide la radiación infrarroja térmica, o calor, emitido desde la superficie de la Tierra.

Las bandas multiespectrales tienen una resolución espacial de 30 metros, mientras que la banda pancromática tiene una resolución de 15 metros y las bandas térmicas una resolución de 100 metros. Los datos adquiridos son procesados en el Nivel 2, lo que garantiza que las imágenes han sido corregidas georreferencial y radiométricamente.

2.3.2. Programa Copernicus

Copernicus es el Programa de Observación de la Tierra de la Unión Europea, con el propósito de proporcionar datos de alta calidad para una variedad de aplicaciones, incluyendo la gestión ambiental, la agricultura, la silvicultura, y la vigilancia de desastres naturales.

La Comisión Europea coordina y gestiona el programa, en cuya ejecución colaboran los Estados miembros, la Agencia Espacial Europea (ESA), la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (Eumetsat), el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo, las agencias de la UE y la empresa Mercator Océan.

Se emplean enormes cantidades de datos globales procedentes de la constelación de satélites conocidos como Sentinel, así como sistemas de medición terrestres, aéreos y marítimos para proporcionar información que ayude a los proveedores de servicios, las administraciones públicas y otras organizaciones internacionales a mejorar la calidad de vida de la ciudadanía europea.

Los servicios de información proporcionados son de acceso gratuito y abierto para sus usuarios.

Sentinel-2

El satélite Sentinel-2 tiene a bordo un sensor de imágenes multispectrales de alta resolución y de amplio espectro (MSI), con 13 bandas espectrales que ofrece nuevas perspectivas de nuestro suelo y nuestra vegetación, cuatro bandas a 10, seis bandas a 20 y tres a 60 metro de resolución espacial.

La combinación de alta resolución, novedosas capacidades espectrales, un ancho de franja de 290 km y tiempos de revisión frecuentes. Comprende dos satélites idénticos en la misma órbita, separados 180° entre sí para lograr una cobertura y una transmisión de datos óptimas, los cuales cubren la totalidad de la superficie terrestre.

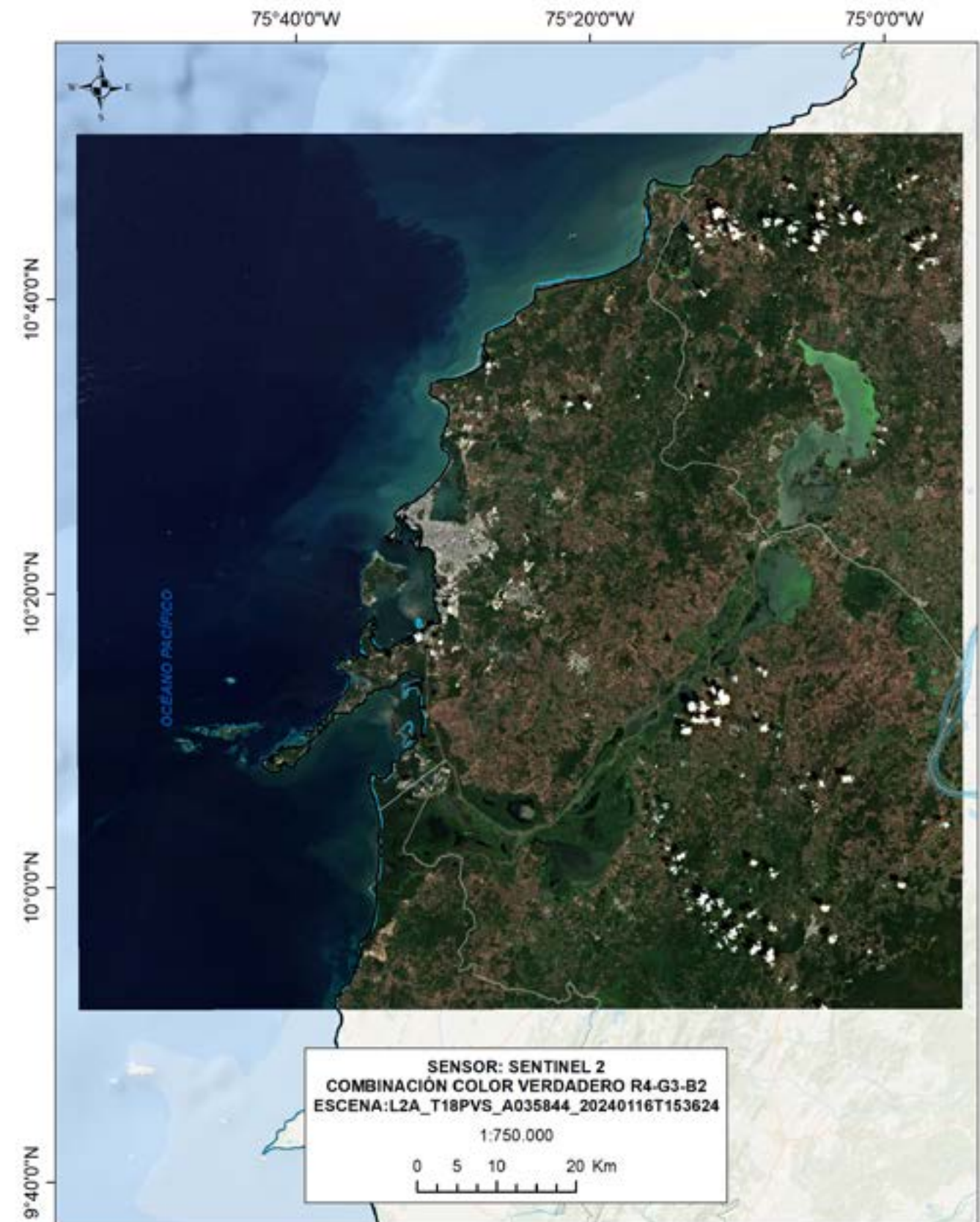


Figura 12. Producto de Sentinel-2 de la zona del subproyecto 3 correspondiente a imagen de color verdadero obtenida mediante la combinación de las bandas correspondientes.

3.GENERALIDADES

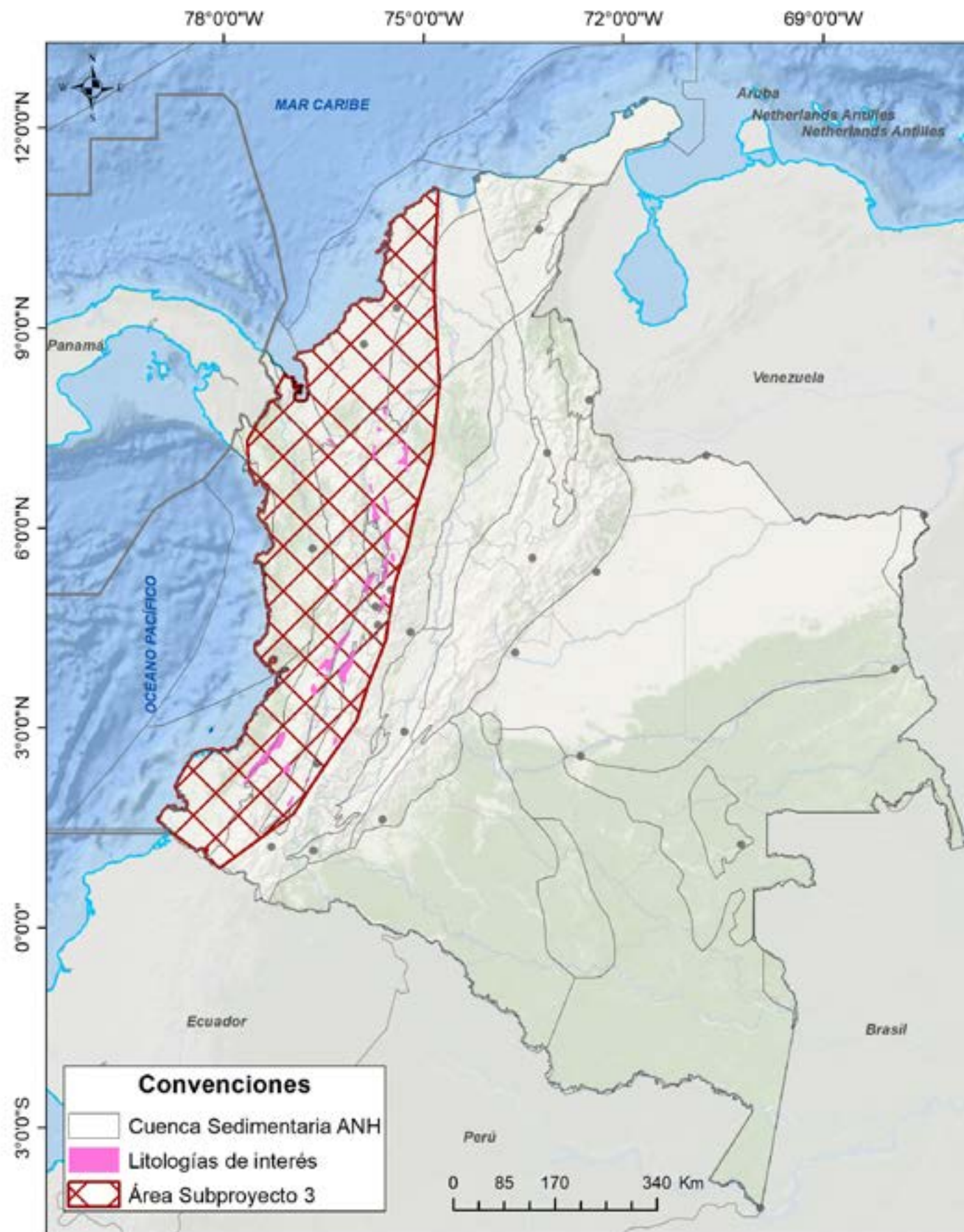


Figura 13. Área de estudio

El área de estudio corresponde al occidente colombiano (Figura 13), abarcando las cuencas sedimentarias de Tumaco, Chocó, Cauca-Patía, Amagá, Sinú-San Jacinto, y parcialmente la cuenca del Valle Inferior del Magdalena, con un área total de 211.923 km². Esta área, para facilitar su análisis, se dividió en tres zonas, considerando grandes límites tectónicos y características geológicas.

Así, al norte se tiene el mar Caribe; al oriente, el Sistema de fallas conocido como Cauca-Romeral; al sur, la frontera con el país vecino de Ecuador; y al occidente, el océano Pacífico y la frontera con Panamá. Con el fin de facilitar la descripción de las unidades potenciales generadoras de hidrógeno, se tuvieron en cuenta los límites tectónicos así como la nomenclatura estratigráfica utilizada en la literatura geológica colombiana.

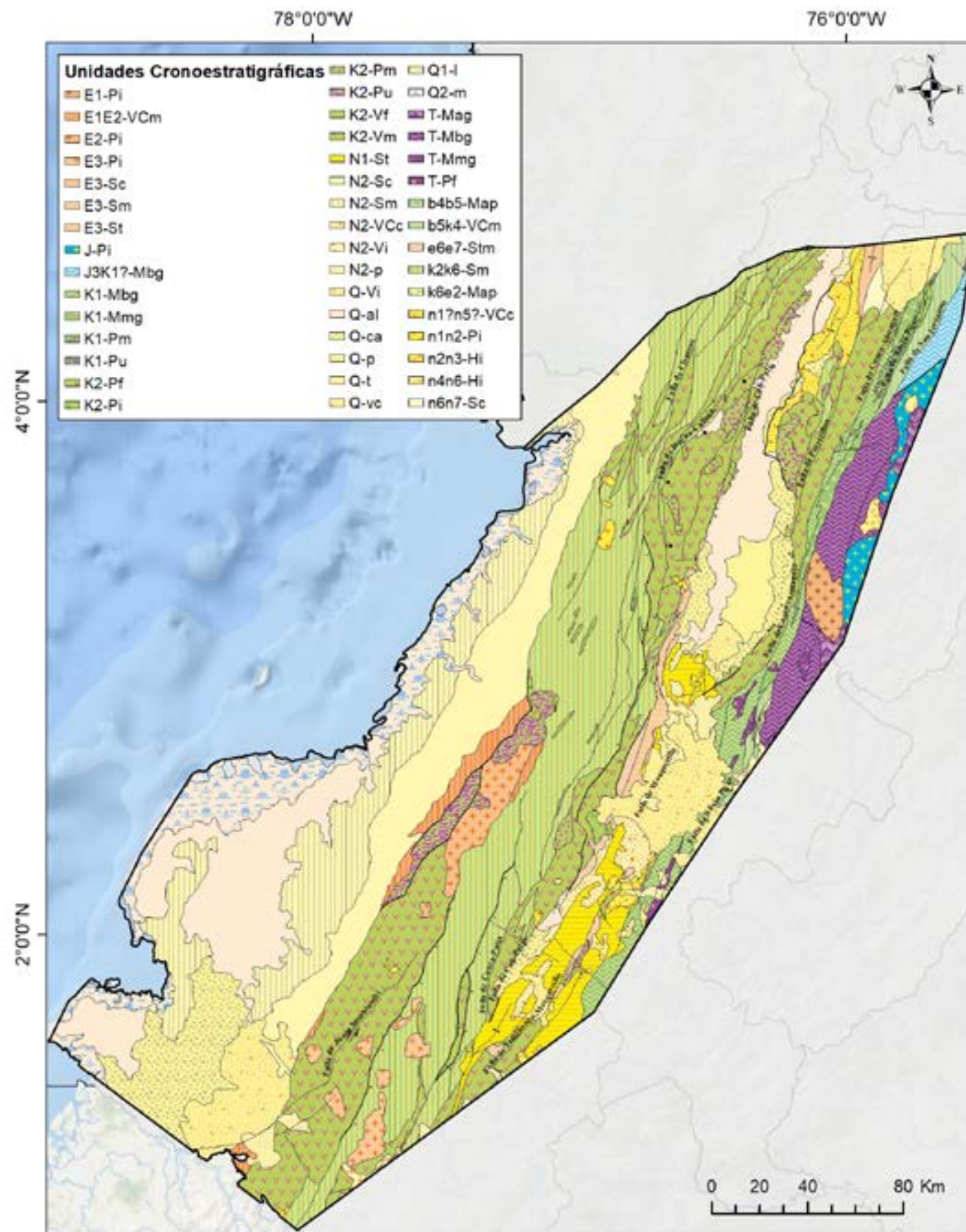


Figura 14. Estratigrafía zona sur del área de estudio

Zona Sur

De sur a norte, se define la zona sur del proyecto (Figura 14) como parte del PLOCO (Provincia Litosférica Oceánica Cretácica Occidental), tomando como límite sur de esta subzona la frontera con Ecuador, caracterizada por una cubierta de material volcánico reciente en el departamento de Nariño, y al norte la Falla de Garrapatas y/o las fallas de Aguasal-Amurrapá, también llamada Falla de San Juan.

La nomenclatura estratigráfica utilizada corresponde a rocas de plateau como la Formación Volcánica, el Complejo Ofiolítico de Bolívar, el Macizo ofiolítico de Ginebra, el complejo Venus, cuerpos de gabros como Riofrío y Darién entre otros.

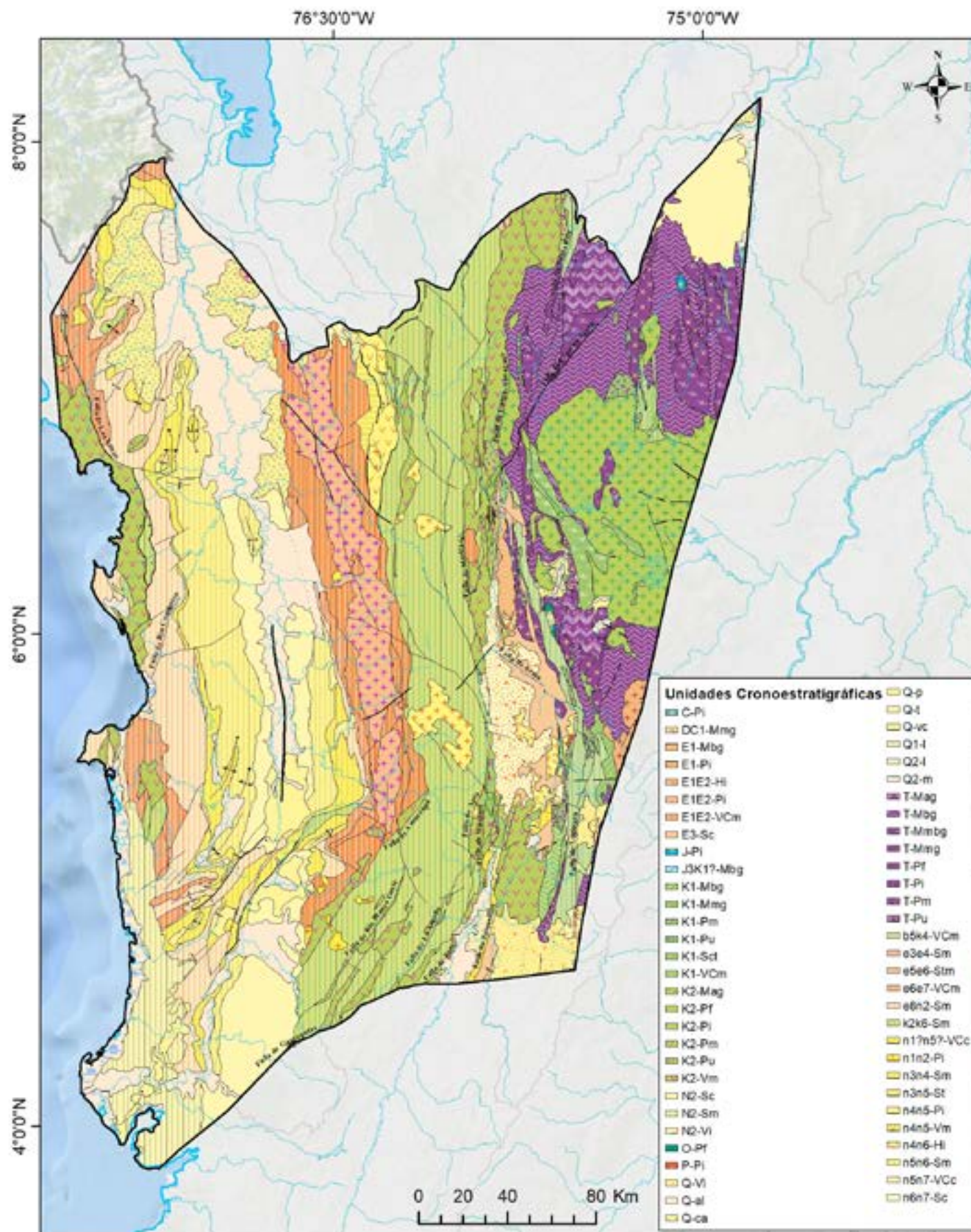
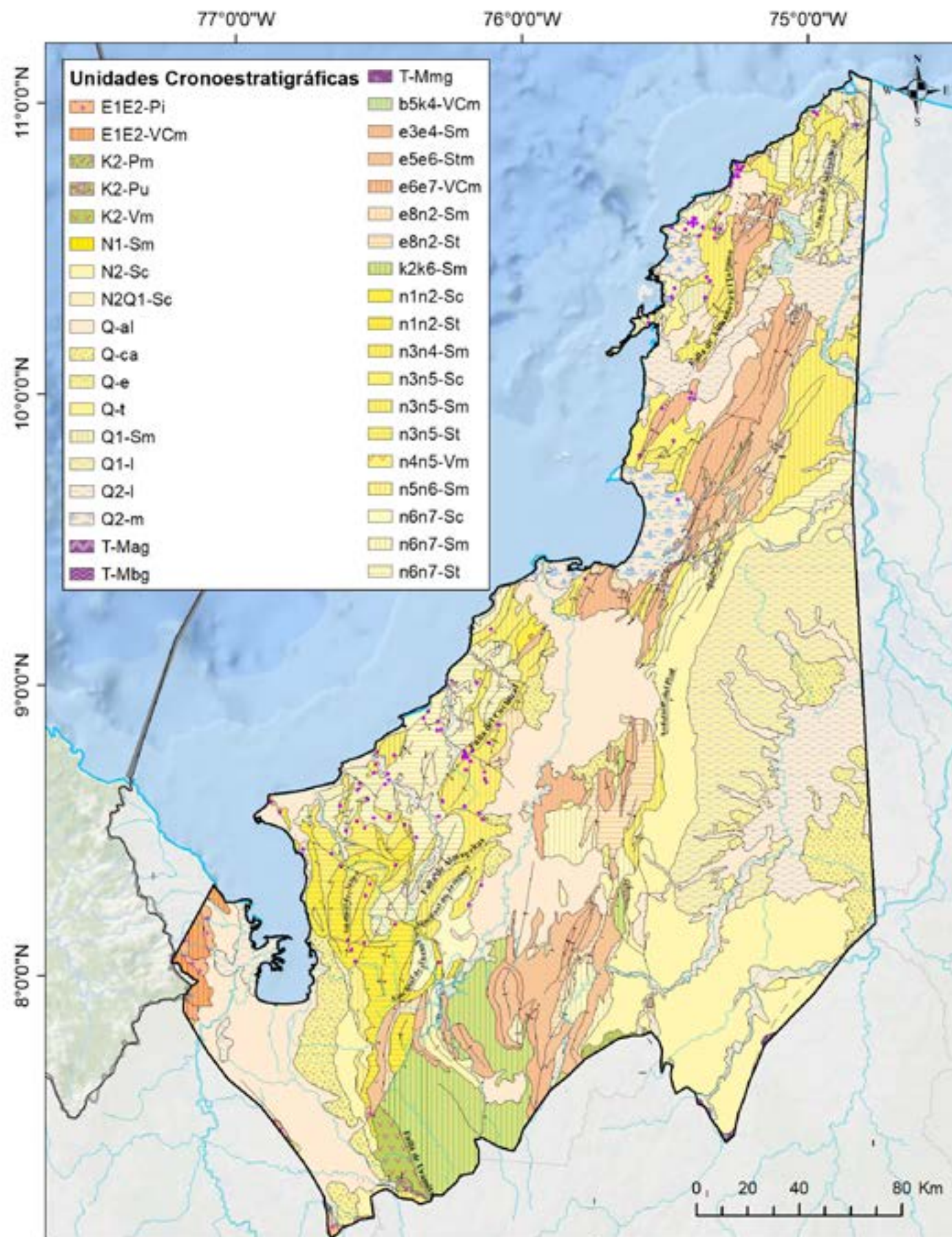


Figura 15. Estratigrafía zona centro del área del proyecto

Zona central

Al norte de la Falla de Garrapatas se definió la zona Central (Figura 15), la cual comprende el Bloque Cañasgordas y el bloque conocido como Chocó-Panamá.

La nomenclatura estratigráfica para gran parte de este bloque establece para las rocas volcánicas básicas de la cordillera Occidental la denominación de Formación Barroso, la cual no se usa y en su defecto, en la actualidad, se separan las unidades por su ambiente tectónico de generación, edad y composición. Se emplea el nombre de Diabasas de San José de Urama para los basaltos de plateau y para los basaltos y andesitas basálticas de arco volcánico cretácico el nombre de Formación Barroso en el bloque Cañasgordas. Al Occidente está el Arco Chocó – Panamá, con el Batolito de Mandé y las rocas volcánicas asociadas (Complejo Santa Cecilia-La Equis).



Zona Norte

La zona Norte (Figura 16) se caracteriza por escasos afloramientos de rocas básicas y ultrabásicas y por una importante cobertura de rocas sedimentarias del Cenozoico, que hacen que se diferencie geológicamente de las otras dos subzonas mencionadas. La cobertura sedimentaria puede comportarse como trampa de hidrógeno, considerando que suprayace rocas básicas y ultrabásicas que no afloran en superficie.

Figura 16. Estratigrafía zona norte.

4. UNIDADES GEOLÓGICAS POTENCIALES PARA GENERACIÓN DE HIDRÓGENO NATURAL EN EL SUBPROYECTO 3

4.1. Marco geológico regional

La descripción de la geología se hace por unidades geológicas potenciales para la generación de hidrógeno natural, donde se reconocen estructuras circulares que podrían ser fuentes de emanación de hidrógeno (Figura 17).

Se consideran como unidades potenciales para la generación de hidrógeno natural, aquellas constituidas por basaltos, gabros, metagabros y peridotitas, algunas de estas como parte integrante de las secuencias ofiolíticas parciales y/o desmembradas.

Se consideran las unidades que afloran en la cordillera Occidental, unidades que afloran en la cordillera Central, y unidades que presentan estructuras circulares que pueden actuar como trampas para hidrógeno en la región Caribe.

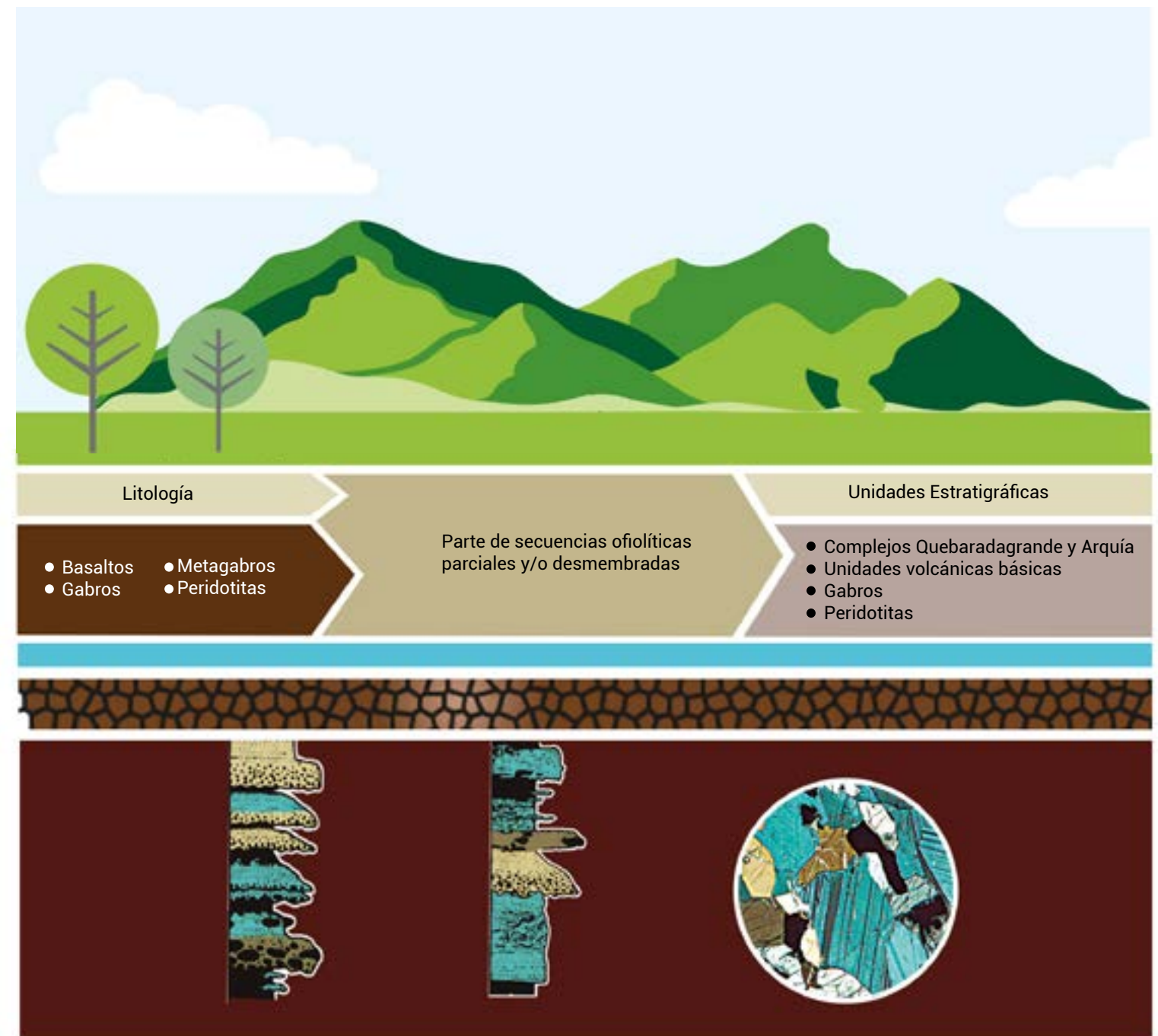


Figura 17. Unidades geológicas potenciales para generación de Hidrógeno en el Occidente Colombiano.

4. UNIDADES GEOLÓGICAS POTENCIALES PARA GENERACIÓN DE HIDRÓGENO NATURAL

Algunas litologías corresponden a litodemas como los complejos Quebradagrande y Arquía; otros son unidades volcánicas básicas, gabros y peridotitas que afloran en la margen occidental de la cordillera Central y en la cordillera Occidental, formadas en ambientes de meseta oceánica (plateau) y en arcos volcánicos insulares y de margen continental. Junto a los litodemas se presentan escamas ultrabásicas que probablemente indican los límites de sutura de terrenos geológicos en el occidente colombiano, (Figura 18).

Las unidades geológicas con potencial de generación de H₂ en la cordillera Occidental, están constituidas por rocas formadas en un ambiente de plateau oceánico, en general constituidas por basaltos toleíticos, gabros y rocas ultrabásicas y algunos basaltos formados en ambientes de arco volcánico (Figura 19 y Figura 20); en la cordillera Central son las unidades relacionadas con los complejos Quebradagrande y Arquía (Figura 21).

En el Caribe colombiano, las unidades sedimentarias que afloran en superficie podrían comportarse como reservorios para entrapamiento de hidrógeno natural, en especial aquellas que reposan sobre basamento de rocas básicas y ultrabásicas (Figura 22).

En la cordillera Central las unidades donde se reconocieron estructuras circulares que asemejan círculos de hadas corresponden a los complejos Quebradagrande, Arquía y Amaime-Barroso, en los alrededores de los municipios de Sotaró y Silvia, los complejos ofiolíticos de Los Azules, Ginebra, Pácora y Filadelfia, el Stock gabroide de Pereira y los Basaltos de San Pablo (Figura 21).

El Complejo Quebradagrande, en Sotaró y Silvia-Cauca, está constituido por una secuencia vulcano-sedimentaria constituido por metabasaltos, metatobas básicas, diques de metadiabasa, y por sedimentitas conformada por grauvacas, areniscas, limolitas, arcillolitas y chert. Los metabasaltos y metadiabasas se componen de plagioclasa, como fenocristal o microlitos en la matriz, augita o pigeonita muy alterados, minerales opacos, que corresponden a magnetita, pirita y esfena.

En el Caribe Colombiano se caracterizaron anomalías tipo círculos de hada, principalmente en la secuencia sedimentaria Cenozoica que se extiende desde el Nudo de Paramillo, hacia el norte, hasta las costas del mar Caribe, pasando principalmente en el bloque Sinú-San Jacinto (Figura 22).

Las unidades donde se identificaron anomalías de la más antigua a la más reciente son: Formación San Cayetano, Formación Cerrito, Formación Toluviejo, Formación Carmen y Formación Toluviejo.

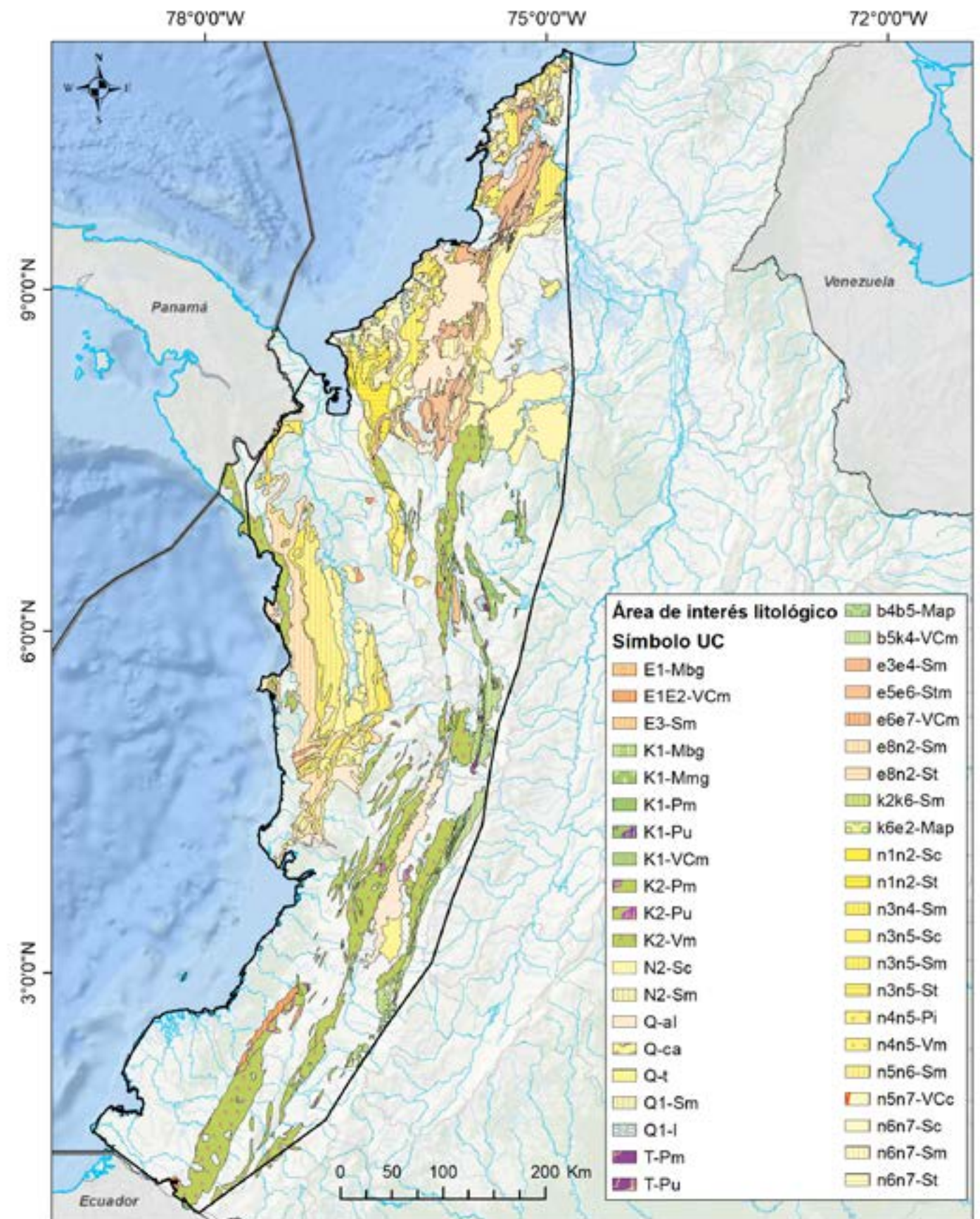


Figura 18. Unidades potenciales para la generación de hidrógeno natural en el subproyecto 3. Base geológica tomada de Gómez et al. (2023).

4. UNIDADES GEOLÓGICAS POTENCIALES PARA GENERACIÓN DE HIDRÓGENO NATURAL

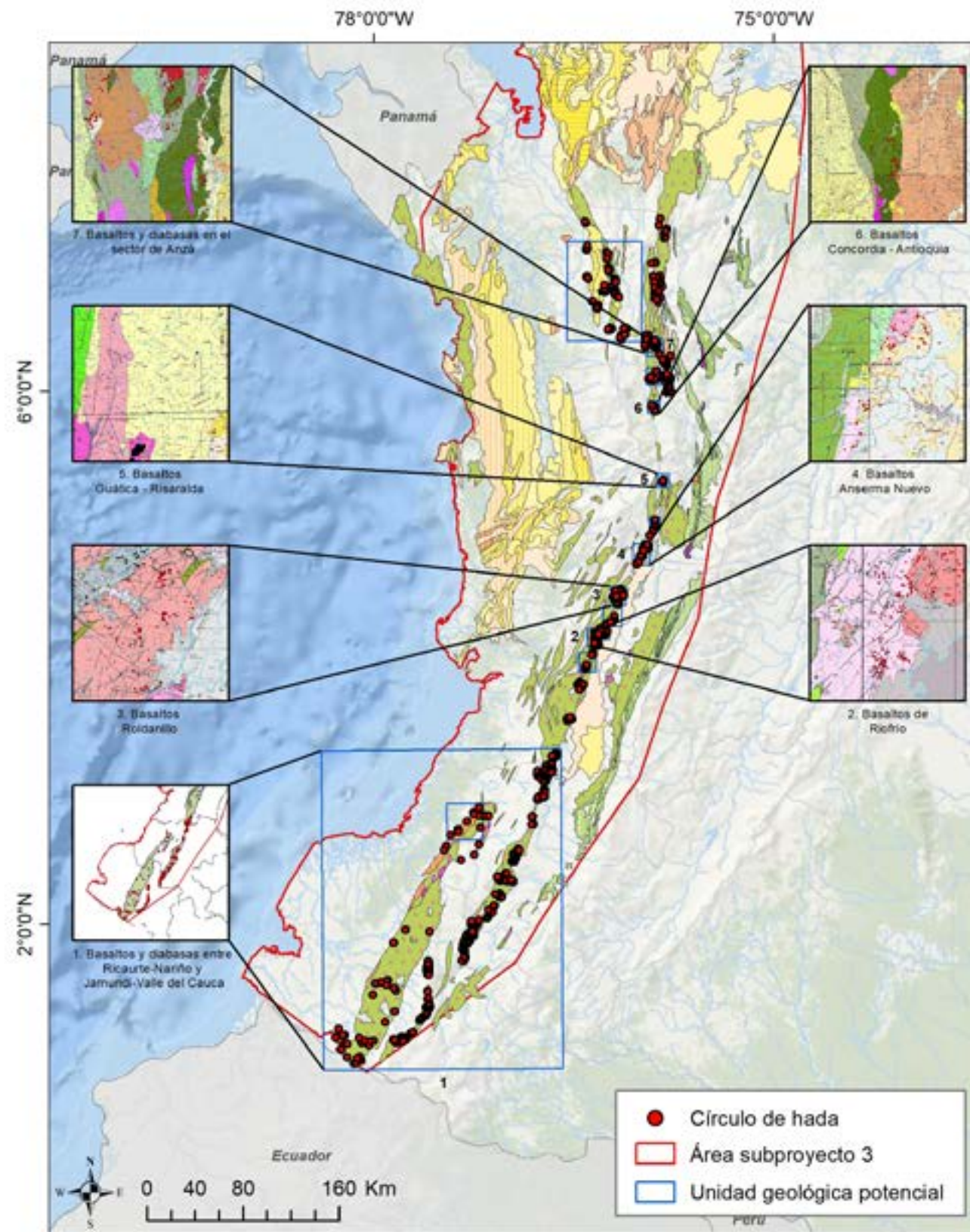


Figura 19. Geología de los sectores potenciales para la generación de hidrógeno natural donde se reconocen estructuras circulares en la cordillera Occidental.

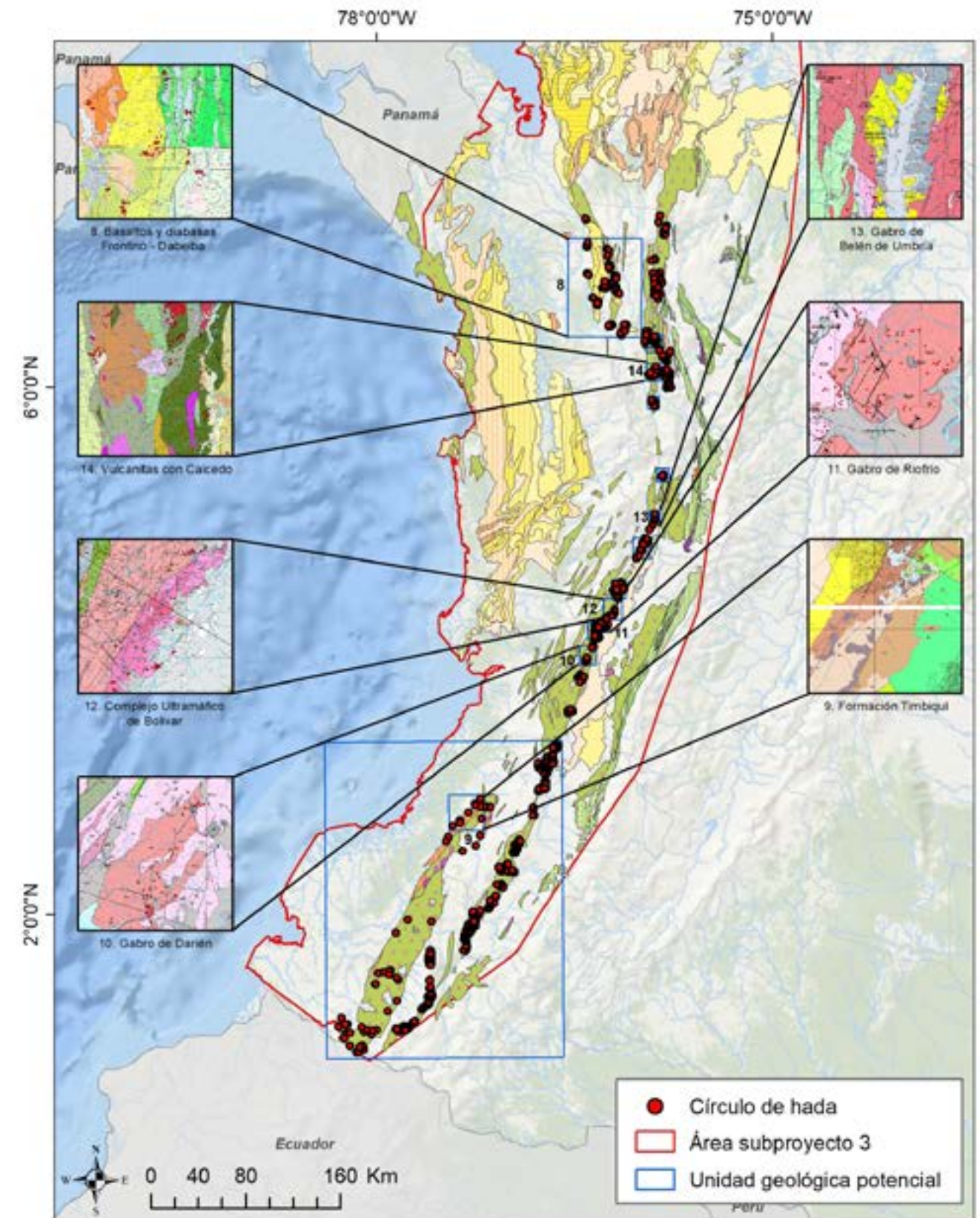


Figura 20. Geología de los sectores potenciales para la generación de hidrógeno natural donde se reconocen estructuras circulares en la cordillera Occidental.

4. UNIDADES GEOLÓGICAS POTENCIALES PARA GENERACIÓN DE HIDRÓGENO NATURAL

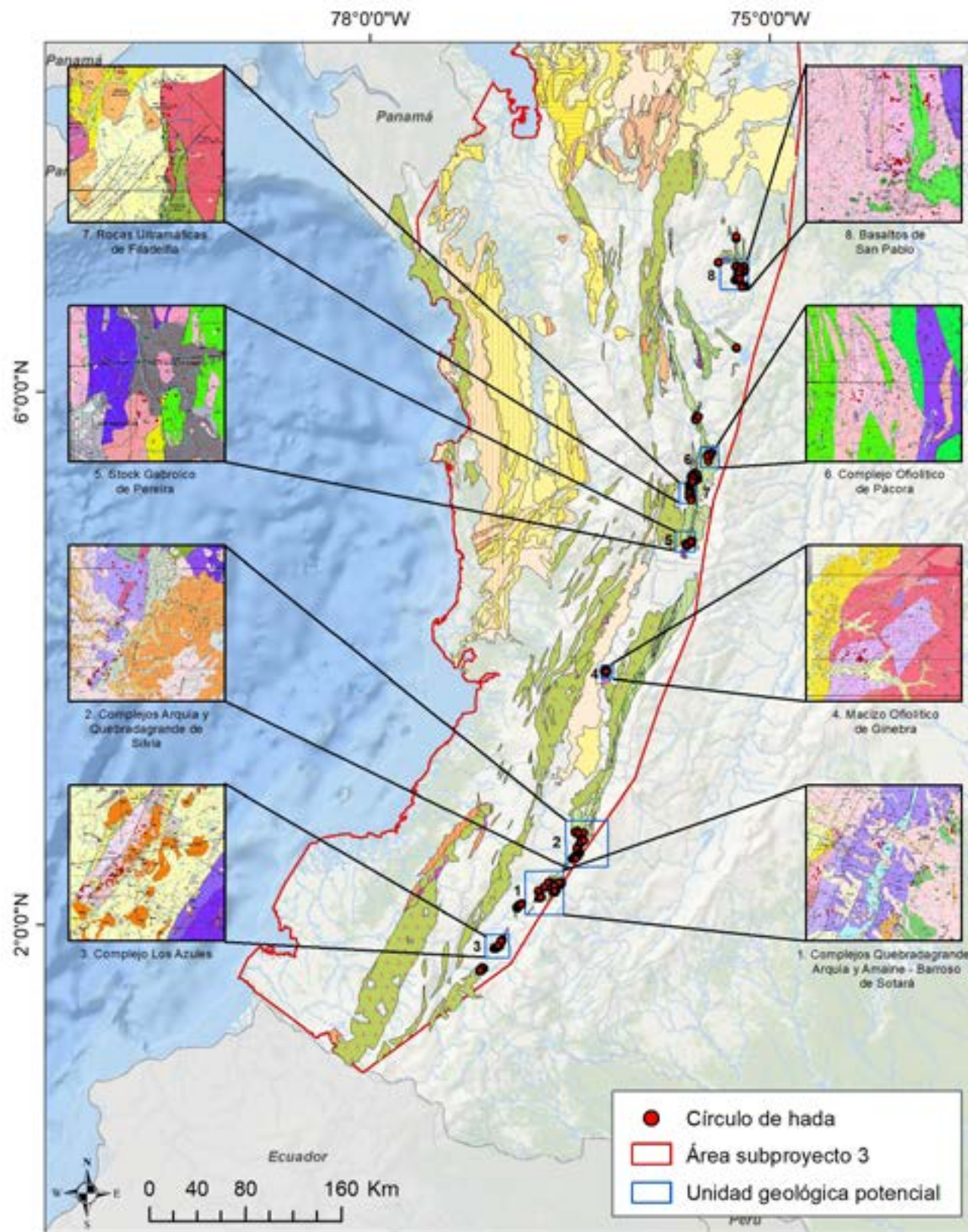


Figura 21. Geología de los sectores potenciales para la generación de hidrogeno natural donde se reconocen estructuras circulares en la cordillera Central.

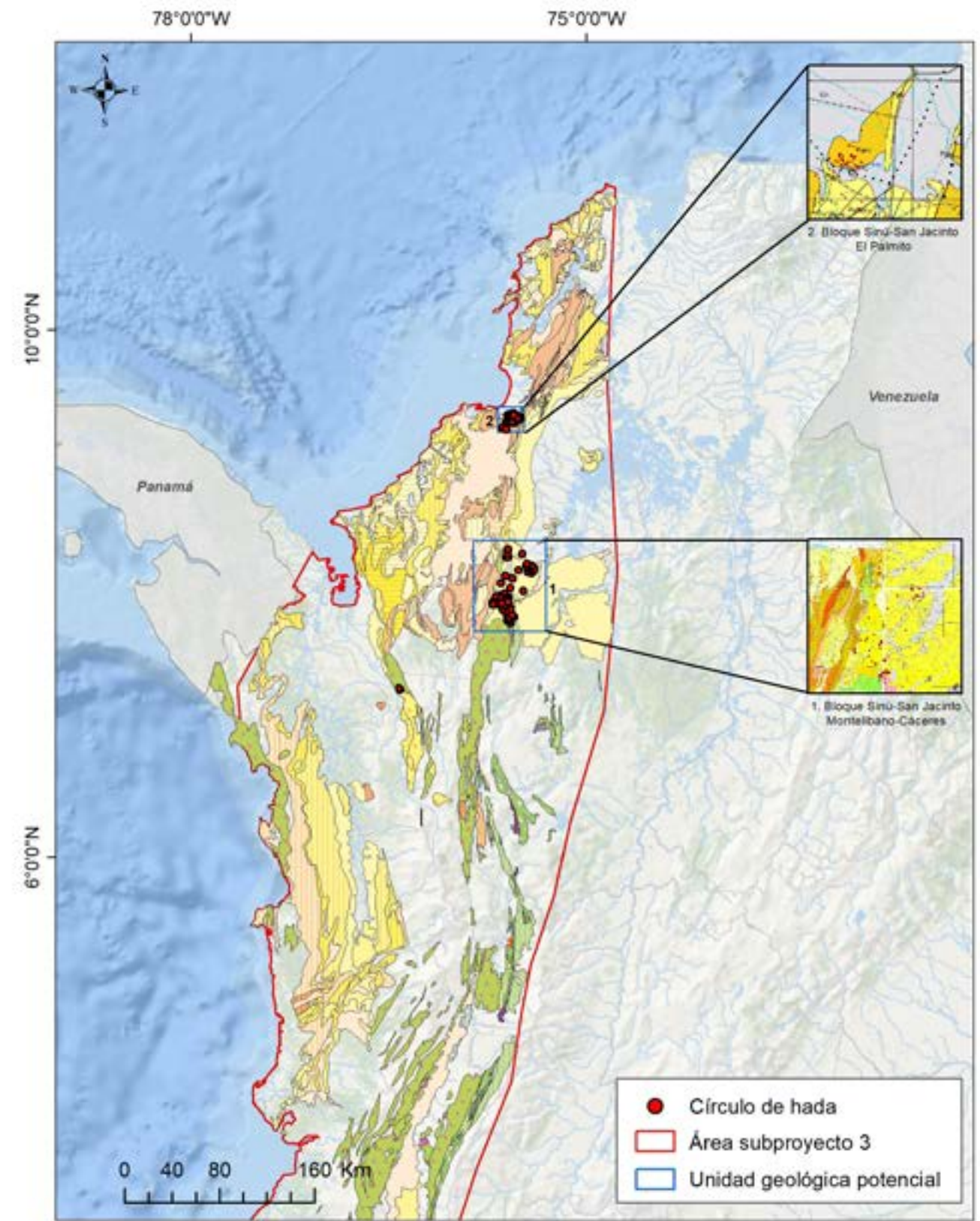


Figura 22. Geología de los sectores potenciales para la generación de hidrogeno natural donde se reconocen estructuras circulares en la subzona del caribe colombiano.

4.2. Composición, textura y alteraciones en unidades geológicas potenciales para generación de hidrógeno natural en el subproyecto 3

La composición y textura de las diabasas y basaltos de plateau no cambian en los diferentes bloques que afloran en el subproyecto 3, y tienen texturas intergranulares, subofítica, intersertal, ofítica y variolíticas. Estas rocas están constituidas por plagioclasa generalmente espilitizada y clinopiroxeno de tipo augita-pigeonita junto con clorita y palagonita intersertal producto de alteración del vidrio o como relleno de vacuolas, como minerales accesorios se identifican titanita e ilmenita (Figura 23).

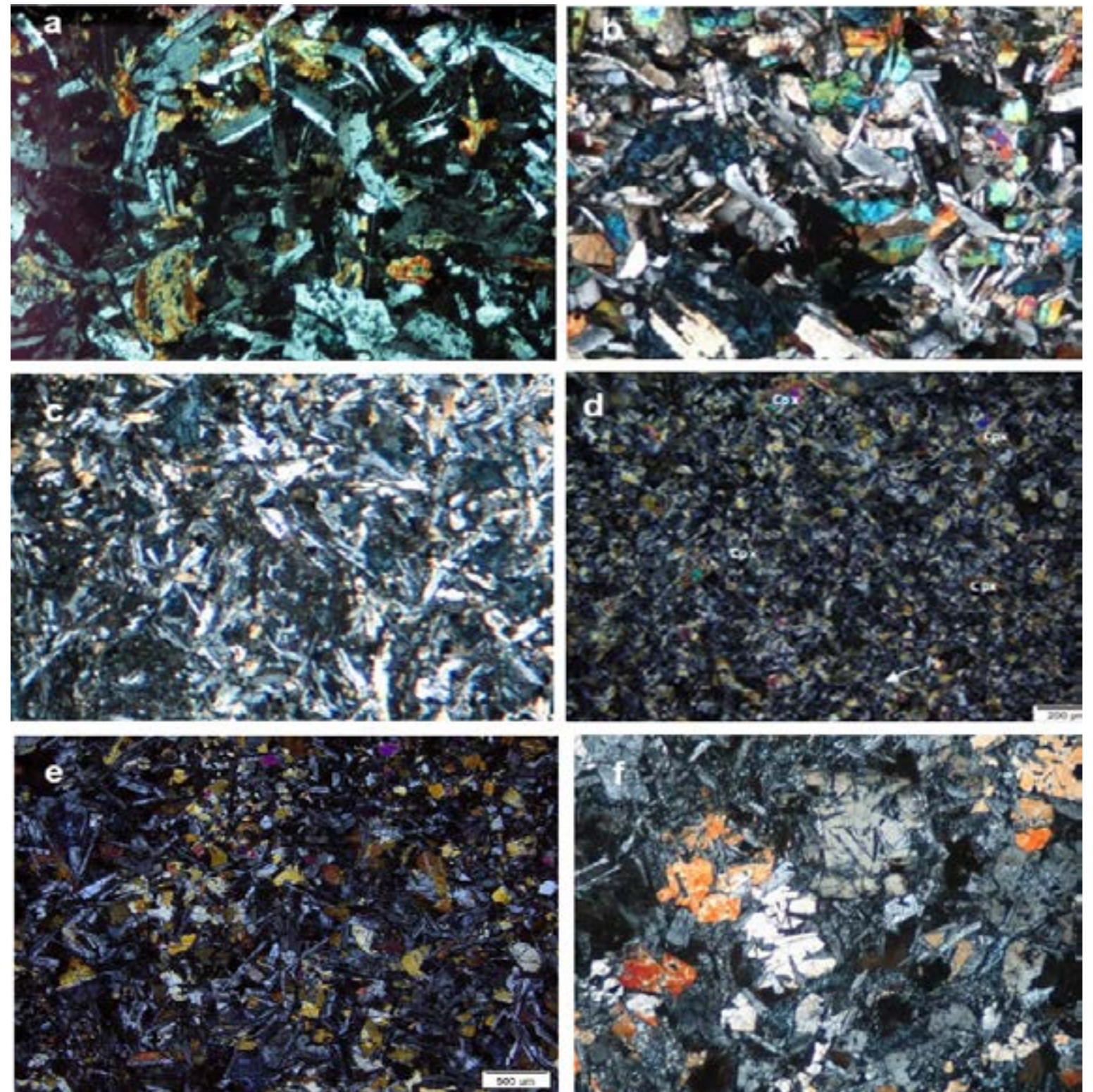


Figura 23. Textura y composición de diabasas y basaltos formados en ambiente de plateau oceánico, en diferentes sectores de la cordillera Occidental donde se reconocen estructuras circulares. a) Ricaurte-Nariño y Jamundí-Valle del Cauca; b) Riofrío; c) Roldanillo-Anserma Nuevo; d) Concordia; e) Anzá; f) Frontino.

4. UNIDADES GEOLÓGICAS POTENCIALES PARA GENERACIÓN DE HIDRÓGENO NATURAL

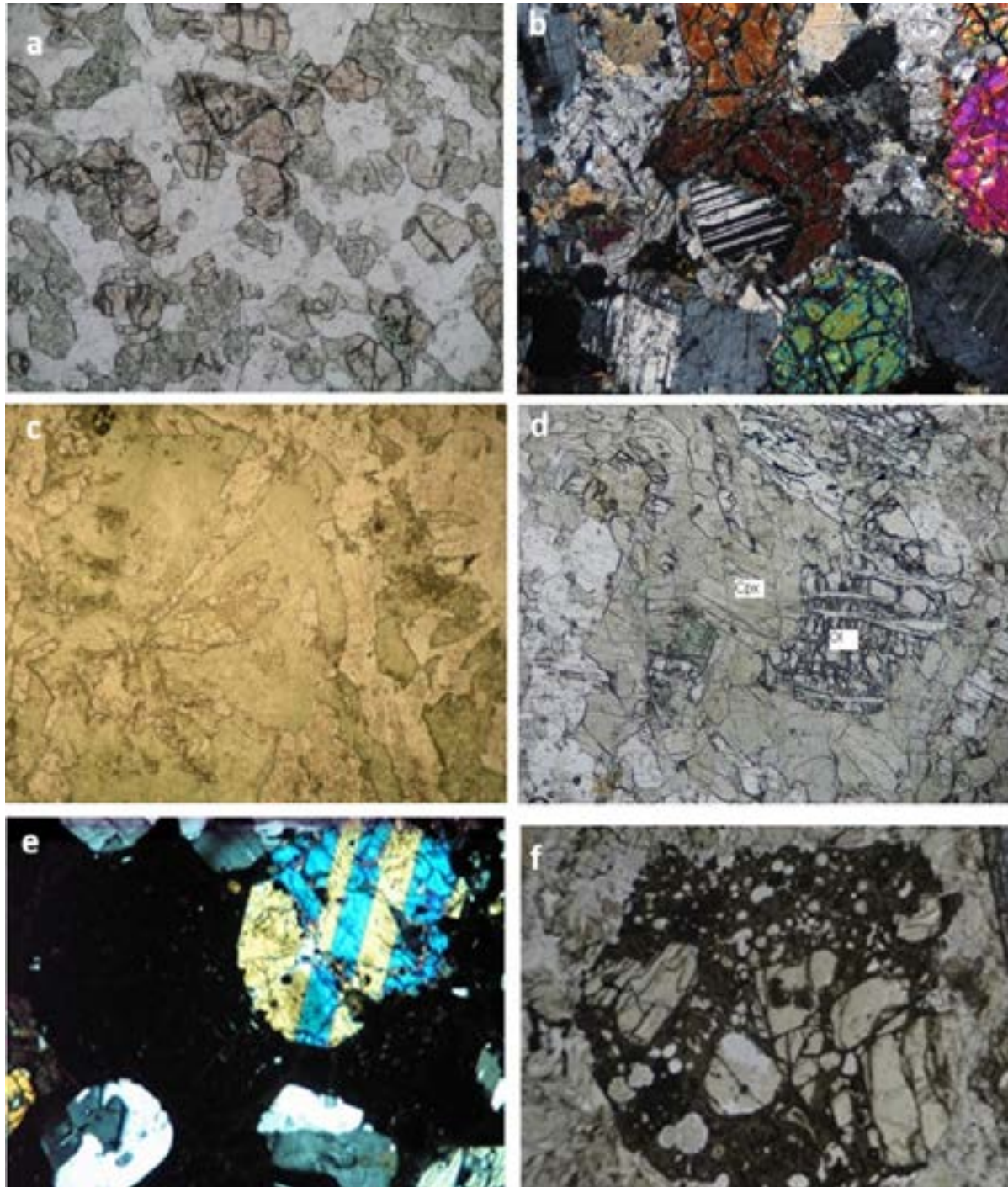


Figura 24. Textura y composición de gabros en diferentes sectores de la cordillera Occidental y composición de lavas y rocas fragmentales de las formaciones Timbiquí y las vulcanitas de Caicedo. a) Gabro de Darién; b); c) Gabro de Belén de Umbría; d) Gabro de Ríofrío; e) basaltos con fenocristales de piroxeno y plagioclasa de la Fm Timbiquí y f) rocas fragmentales de las Vulcanitas de Caicedo

Los gabros presentan texturas ofíticas, subofíticas, granulares e inequigranulares, constituidos principalmente por plagioclasa y minerales máficos (hornblenda, clipiroxeno y menos frecuente ortopiroxeno y olivino) en proporciones similares. Algunos gabros localmente tienen estructura bandeada, formadas por procesos cúmulos, marcado por cambios en el tamaño de los cristales y por variaciones composicionales en el contenido de minerales máficos y félsicos. Pueden aparecer facies de gabros hornbléndicos, gabro noritas, piroxeno-hornbléndicos, gabros olivínicos y facies félsicas de tonalitas y plagiogranitos (Figura 24 y Figura 25).

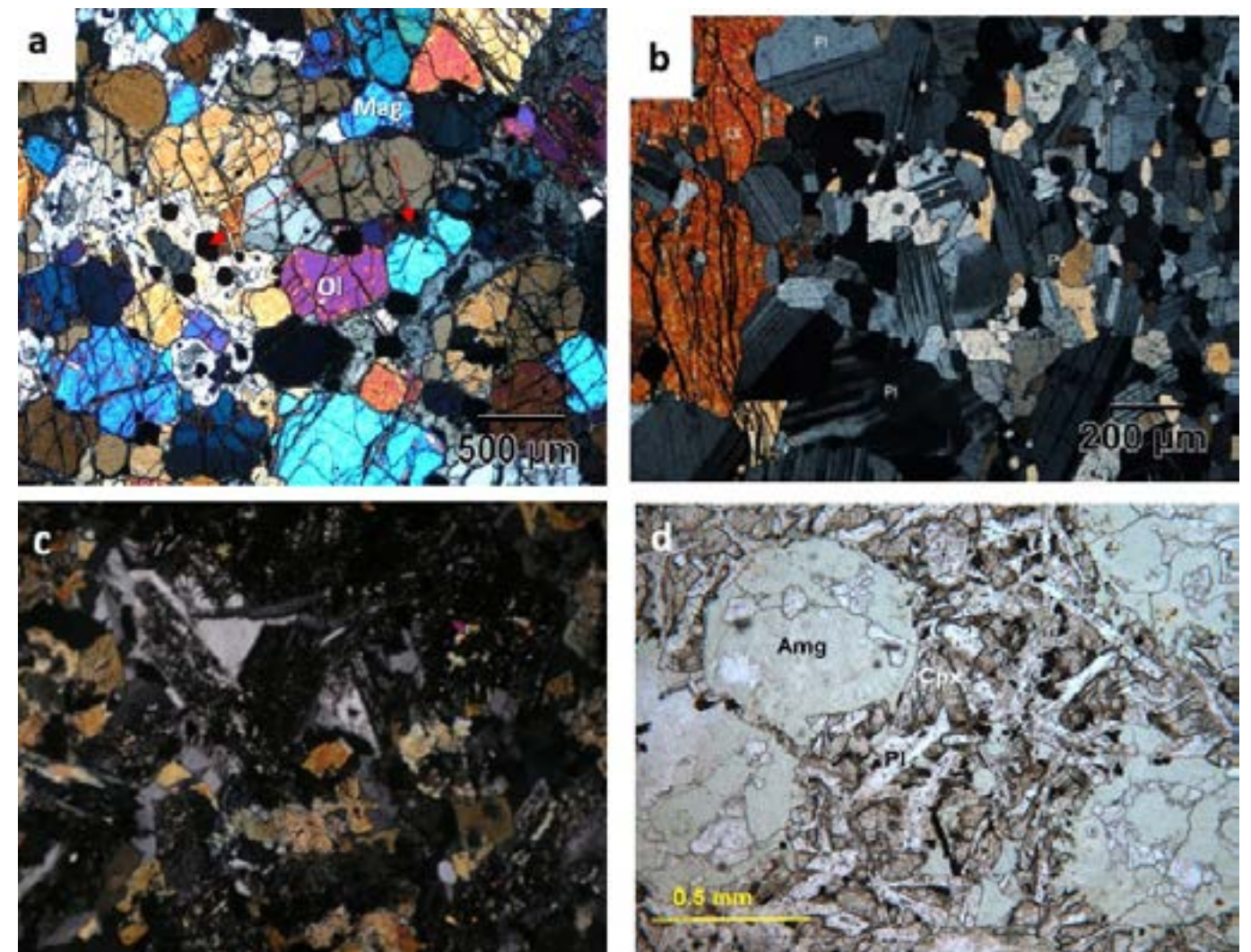


Figura 25. Composición y texturas de unidades potenciales para generar hidrógeno natural en la cordillera Central. a) Rocas ultramáficas Macizo ofiolítico de Ginebra; b) gabros del Macizo ofiolítico de Ginebra; c) gabro de Pereira y d) basalto de San Pablo.

Las alteraciones de los minerales en los basaltos y diabasas de plateau corresponden a clinopiroxenos alterados a anfíbol uralítico, con estructura fibrosa. El clinopiroxeno se transforma completamente a anfíbol fibroso en las rocas que están alrededor de los gabros por alteración deutérica asociada a la intrusión de gabros. El olivino aparece ocasionalmente en las rocas y puede estar alterado a serpentina. La plagioclasa se transforma a albita por procesos de espilitización y se altera a saussurita (epidota, calcita y sericita) y el vidrio se altera a clorita y palagonita (Figura 26).

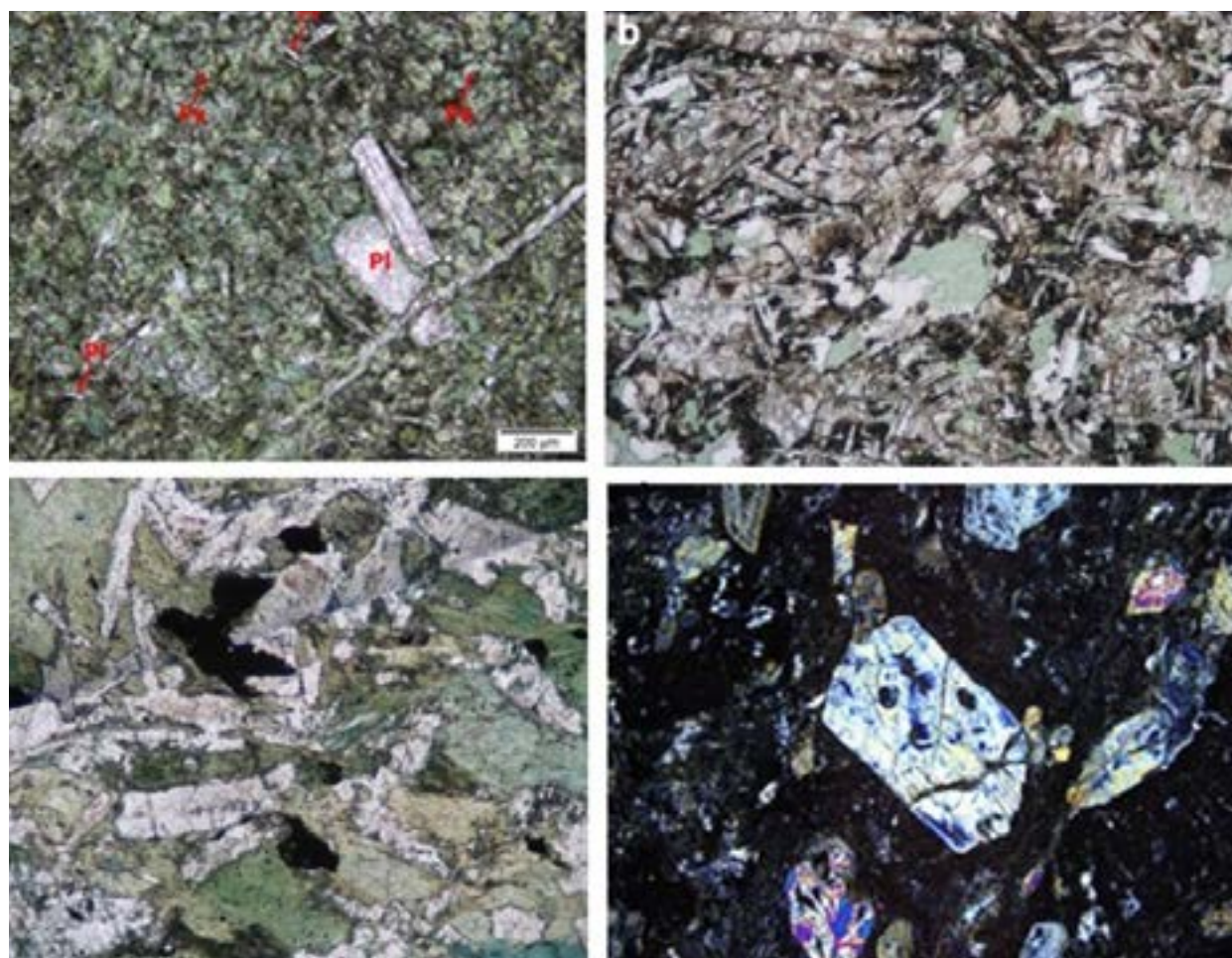


Figura 26. Alteraciones en basaltos, diabasas y gabros en la cordillera occidental. a y c) uralitización de piroxenos en diabasas, basaltos y gabros; b) alteración del vidrio a clorita en diabasas y d) serpentinización de piroxenos en vulcanitas.

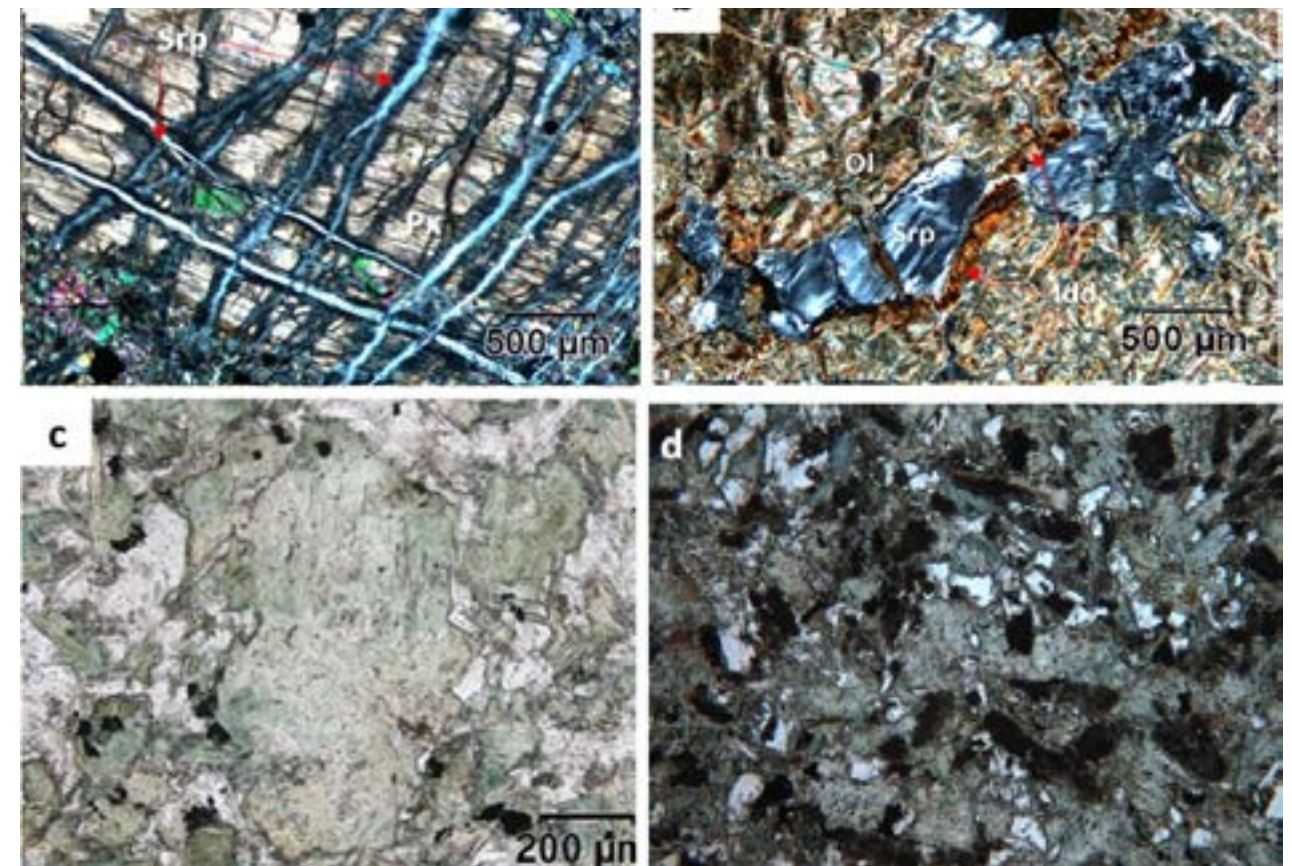
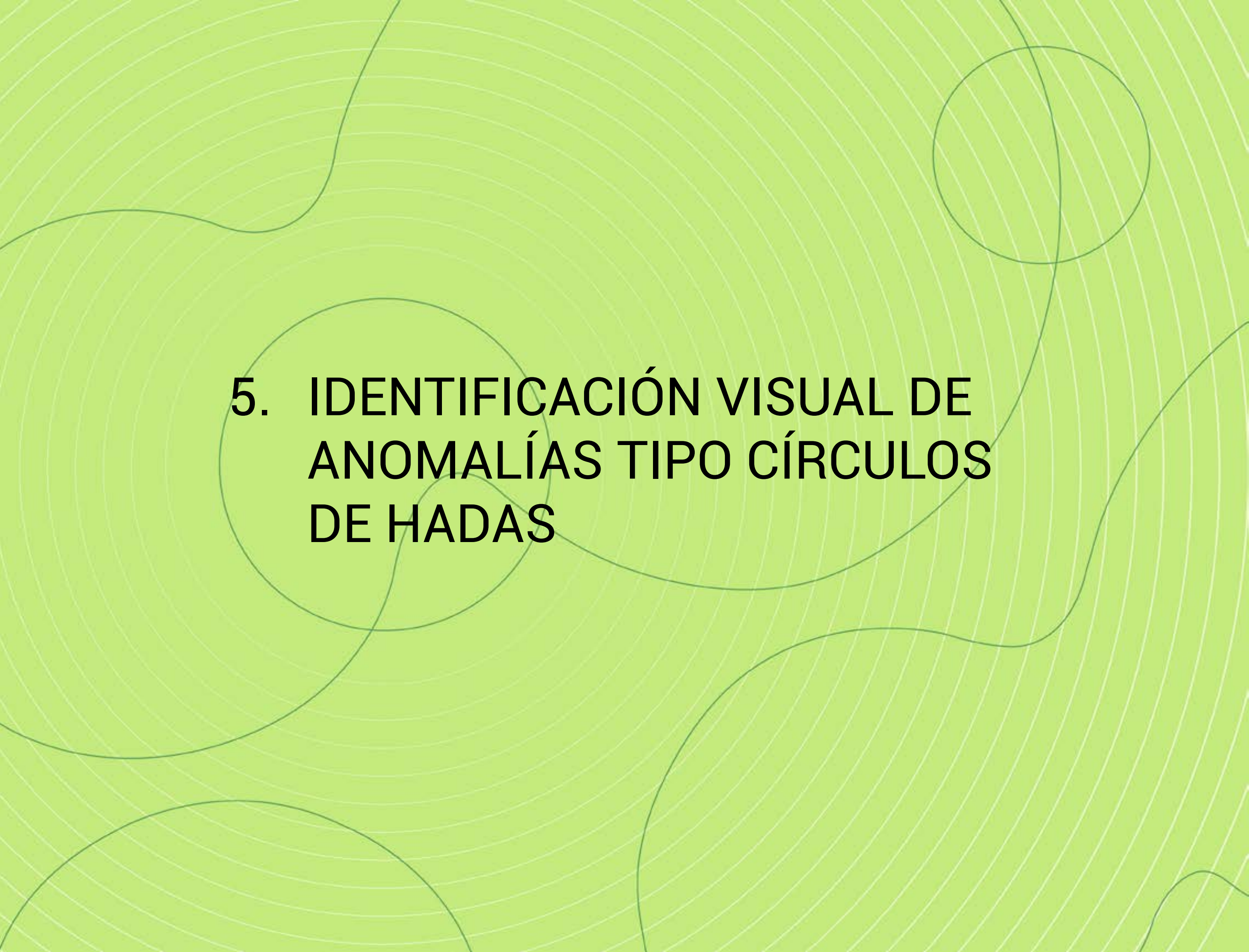


Figura 27. Alteraciones en rocas ultrabásicas, gabros y basaltos de la cordillera Central. a) Cristales de piroxeno cortado por venas de serpentina (crisotilo); b) olivino alterado a serpentina con bordes de iddingsita; c) y d) alteración de clinopiroxeno a anfíbol uralítico en gabros y basaltos.

En los gabros las alteraciones son la uralitización de los piroxenos, el olivino puede estar alterado parcialmente a antigorita e Iddingsita de color pardo terroso con separación de magnetita residual que se acumula en las fracturas y la plagioclasa se altera a saussurita con formación de epidota y clinozoicita secundaria.

Las alteraciones en los macizos ofiolíticos de Los Azules, Ginebra, Pácora y Filadelfia presentan serpentinización de las rocas con formación de crisotilo, lizardita, antigorita, clorita, calcita, iddingsita y perovskita a partir de olivino y piroxenos. En menor proporción del ortopiroxenos y los clinopiroxenos se alteran a minerales del grupo de la serpentina y frecuentemente los clinopiroxenos se transforman en anfíbol uralítico y localmente a talco (Figura 27).



5. IDENTIFICACIÓN VISUAL DE ANOMALÍAS TIPO CÍRCULOS DE HADAS

Previa consulta y recopilación de documentos, imágenes, datos geospaciales de diferentes fuentes, se realizó la consolidación de la información geológica y geoespacial en la región occidental de Colombia, con el fin de identificar anomalías tipo círculos de hadas, que podrían indicar la presencia de hidrógeno (H_2) en el subsuelo del área de estudio, para lo cual se adoptó el derrotero metodológico de la (Figura 28).

Con el fin de ubicar estas anomalías se ejecutó un análisis geológico, en el cual se identifican las formaciones geológicas que favorezcan la generación y acumulación de hidrógeno, complementado por una interpretación fotogeológica orientada a la detección de anomalías tipo círculos de hadas asociados a dicho gas.

La interpretación fotogeológica permite identificar patrones geomorfológicos circulares y evaluar su conexión con procesos subterráneos, mediante el análisis de tonalidades y relieves observados en imágenes, es posible identificar áreas circulares de suelo descubierto, rodeadas de vegetación más densa, las cuales pueden señalar concentraciones de hidrógeno.

5.1. Identificación visual de anomalías

En la región occidental de Colombia se identificaron visualmente anomalías tipo círculos de hadas, asociadas a posibles concentraciones de hidrógeno (H_2) en el subsuelo, mediante un análisis geológico y fotogeológico. Este proceso integró la identificación de formaciones rocosas propicias para la generación y acumulación del gas, junto con la interpretación de imágenes aéreas para detectar patrones geomorfológicos circulares.

Estas anomalías, caracterizadas por áreas de suelo descubierto rodeadas de vegetación densa, se analizaron en términos de tonalidades y relieves, evaluando su relación con procesos subterráneos.

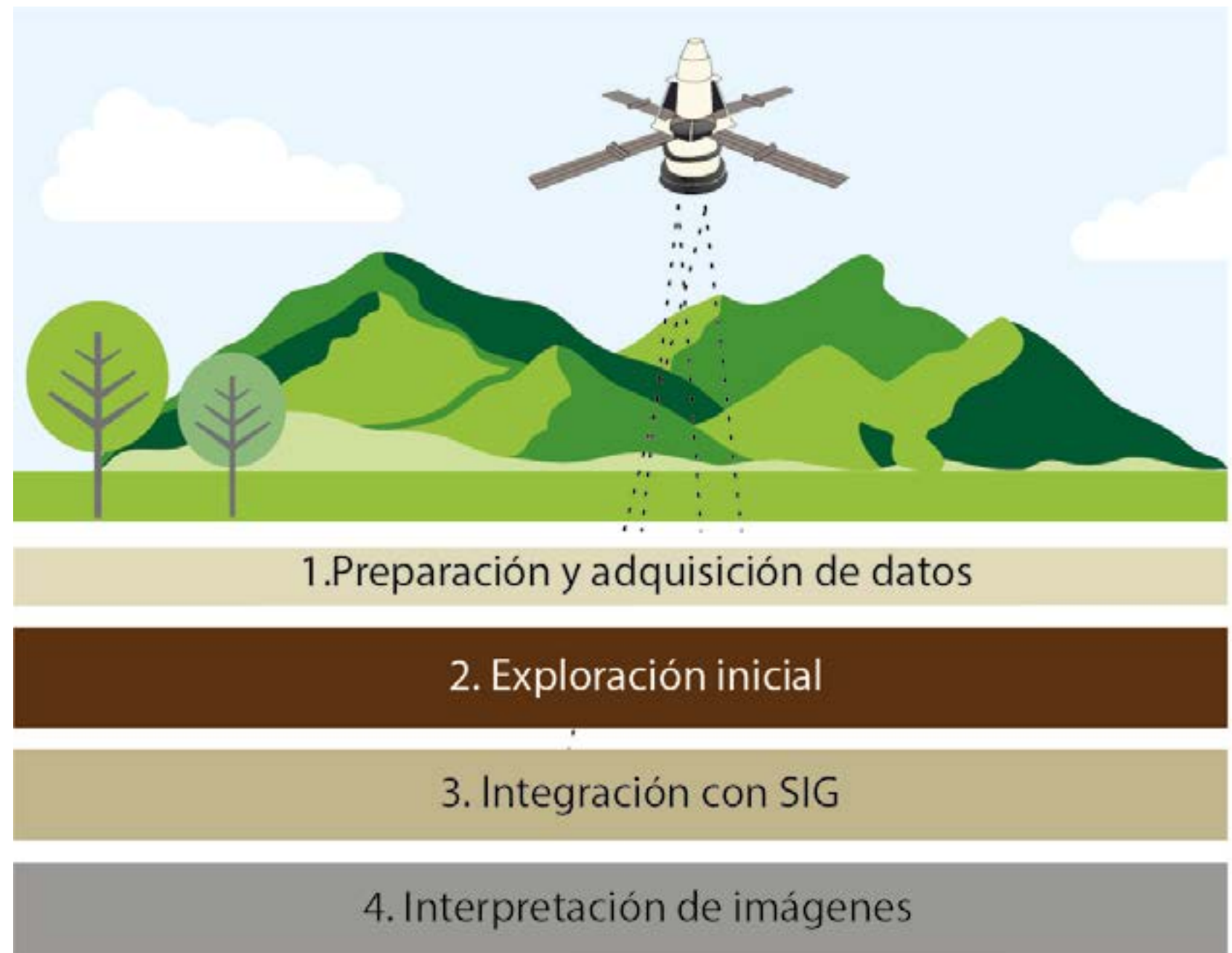


Figura 28. Metodología planteada con el objetivo de identificar las anomalías tipo círculos de hadas.

Anomalías tipo círculos de hadas clase A.

Forma:

Los círculos de hadas presentan una forma predominantemente circular o semicircular de suelo desnudo o con escasa vegetación; en ocasiones se puede observar una concentración de agua en la zona central del círculo.

Borde vegetal:

Los círculos centrales están rodeados por un anillo de vegetación tipo arbustal o arbórea homogéneo que contrasta con el suelo desnudo o el agua en su interior (Figura 29).

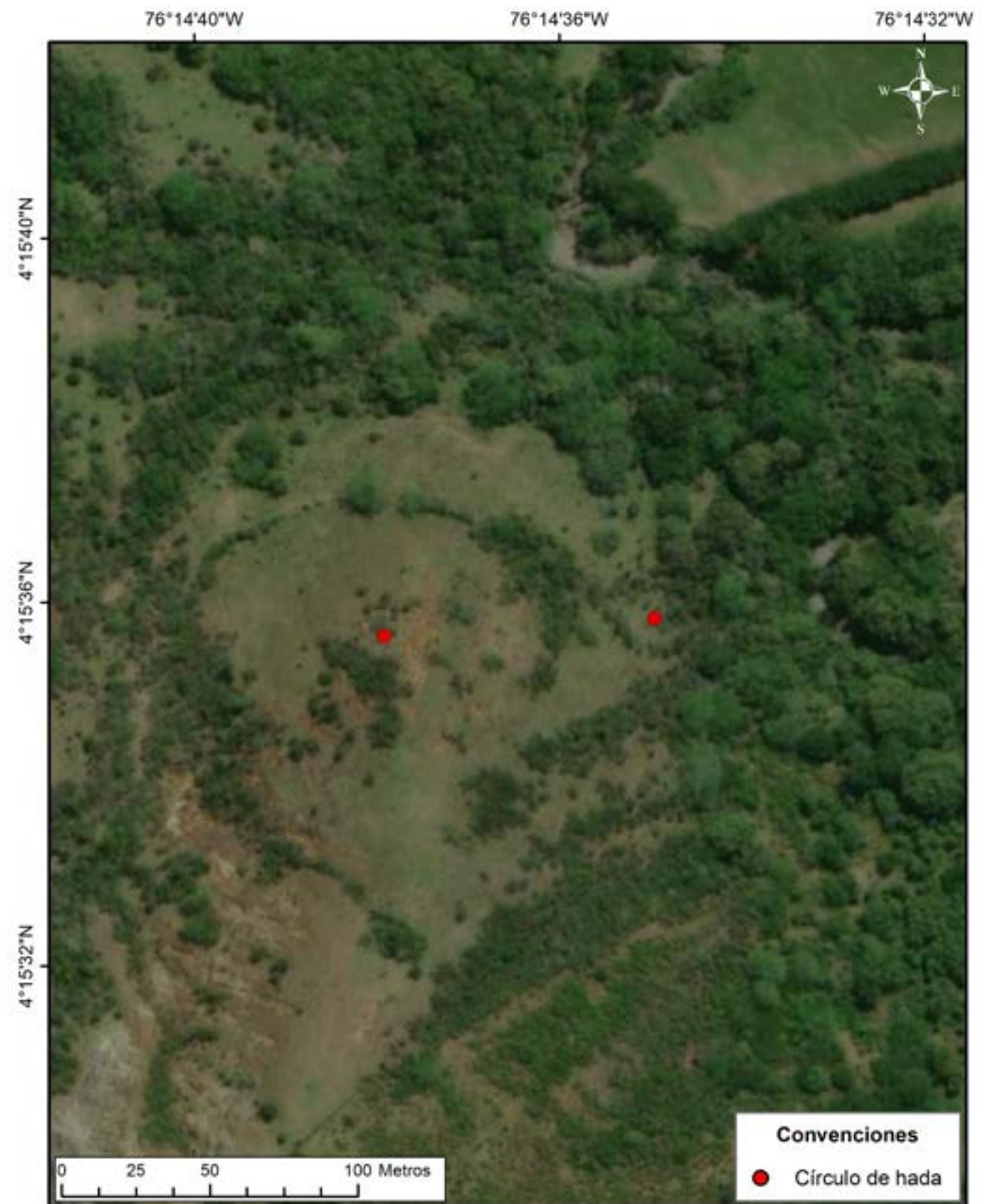
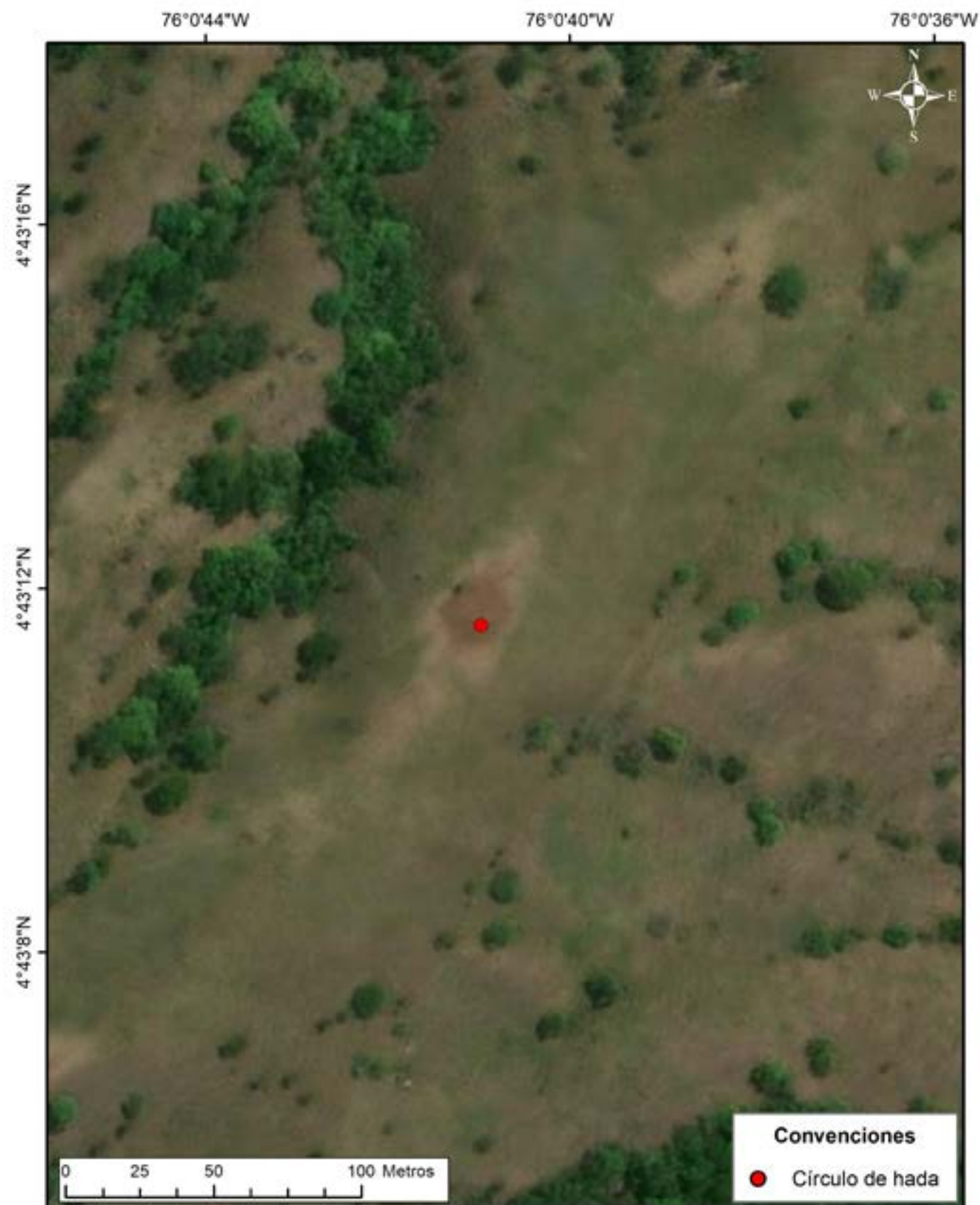


Figura 29. Anomalías tipo círculo de hada clase A, identificado en el área de estudio en el municipio de Trujillo. Se observan dos anomalías tipo círculos de hadas, con forma circular y escasa vegetación en la zona central, rodeados por un anillo de vegetación homogéneo de tipo arbustivo. Fuente: Imagen satelital Google Earth.



Anomalías tipo círculos de hadas clase B.

Forma:

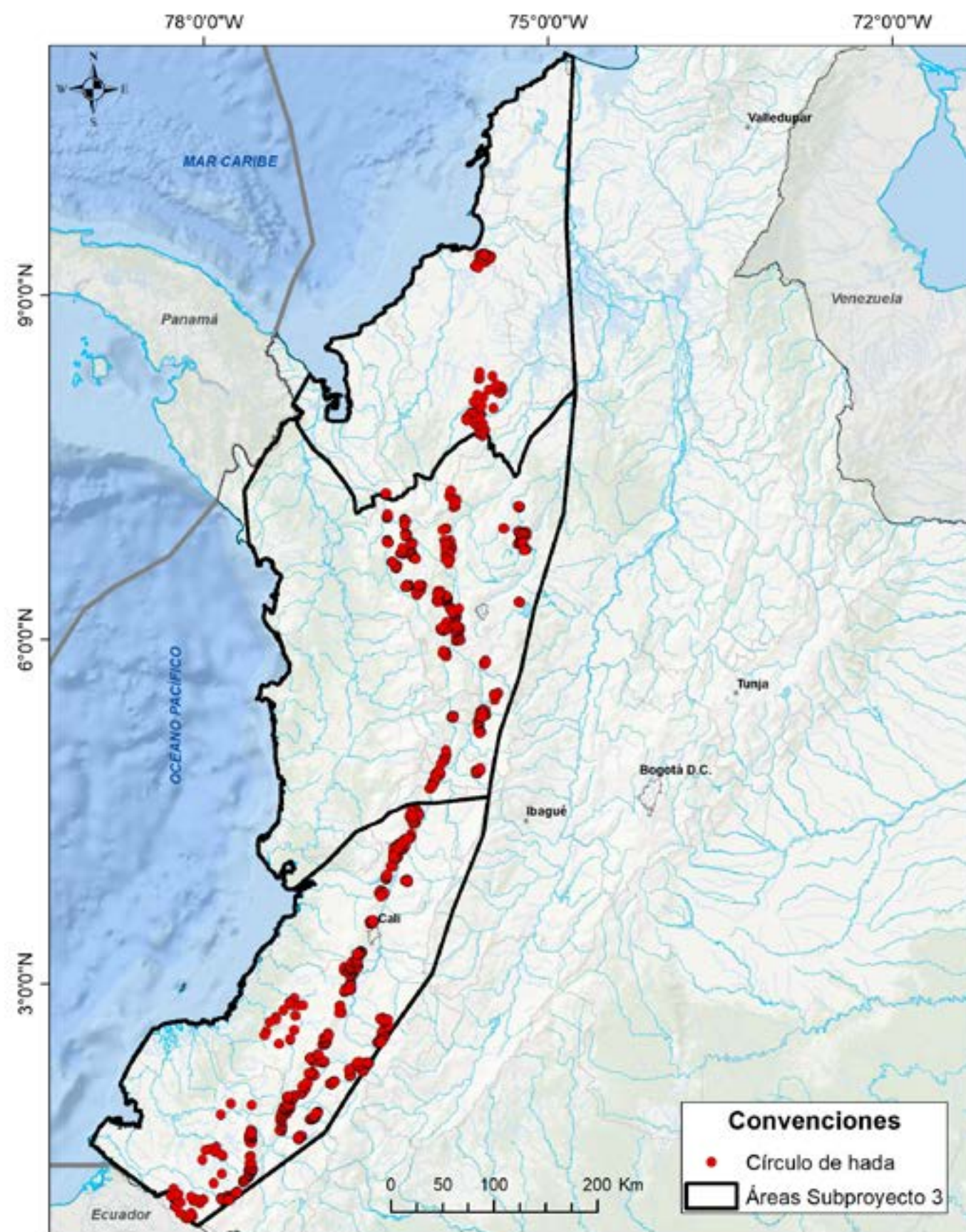
Los círculos de hadas presentan una forma predominantemente circular o semicircular de suelo desnudo o con escasa vegetación, en ocasiones se puede observar una concentración de agua en la zona central del círculo.

Borde vegetal:

Los círculos centrales están rodeados por un anillo de vegetación irregular o escaso, en donde se presenta vegetación tipo pastizal, arbustal o bordes de suelo erosionado, a diferencia de las anomalías clase A que están rodeados por un anillo de vegetación tipo arbustal o arbórea más abundante y homogéneo (Figura 30).

Figura 30. Anomalías tipo círculo de hada clase B, identificado en el área de estudio, municipio de Anserma Nuevo. Se observa una anomalía de círculos de hada, con forma circular y suelo desnudo en la zona central, rodeados por un anillo de suelo desnudo y vegetación tipo pastizal. Fuente: Imagen satelital Google Earth.

5. IDENTIFICACIÓN VISUAL DE ANOMALÍAS TIPO CÍRCULOS DE HADAS



Como resultado del análisis efectuado, se realizó la identificación de 3006 anomalías en el área de estudio del subproyecto 3, las cuales, clasificadas por subzonas y clase se muestran en la Tabla 1, y su distribución en la (Figura 31).

Subzona	Anomalías identificadas	Clase A	Clase B
Subzona Norte	226	7	219
Subzona Centro	1132	82	1050
Subzona Sur	1648	245	1403
Total	3006	343	2672

Tabla 1. Número de anomalías identificadas visualmente en la zona del proyecto.

Figura 31. Anomalías tipo círculo de hadas identificadas en el área de estudio del subproyecto 3.

6. ANOMALÍAS GEOBOTÁNICAS

Los círculos de hadas relacionados con anomalías geobotánicas, específicamente a patrones circulares en la vegetación causados por la liberación de hidrógeno desde el subsuelo son áreas en las que la vegetación crece de forma anómala, generalmente formando un anillo o círculo, debido a la liberación de hidrógeno molecular (H_2) desde el subsuelo.

El hidrógeno puede escapar de fisuras en la corteza terrestre debido a procesos geológicos como la descomposición de minerales, actividad volcánica o tectónica, o incluso procesos de oxidación-reducción. Estas emisiones pueden ser una señal de reservorios de gas o incluso de procesos que ocurren en el manto terrestre. Las zonas donde el hidrógeno se acumula en mayor concentración pueden volverse tóxicas para ciertas plantas o inhibir su crecimiento, en contraste, en los bordes del área afectada, las condiciones pueden ser más favorables para el crecimiento de algunas especies, lo que resulta en un patrón de anillos o círculos visibles en la vegetación.

Las imágenes de satélite permiten observar diversas características en las anomalías geobotánicas que pueden estar relacionadas con procesos subterráneos, cambios ambientales o actividad tectónica. A través de la información espectral y espacial, estas imágenes ayudan a detectar patrones inusuales en la vegetación o el suelo que no son evidentes a simple vista tales como el crecimiento desigual, formas geométricas y estrés en la vegetación.

La identificación de anomalías, estrés vegetal o cambios taxonómicos en la cobertura vegetal mediante imágenes de satélite se realiza mediante el análisis de las variaciones espectrales, empleándose metodologías basadas en índices de vegetación, análisis de variabilidad espectral y de componentes principales (ACP), clasificación supervisada y no supervisada, modelos de transferencia radiativa y análisis hiperespectral.



Figura 32. Metodología para la definición de anomalías geobotánicas.

6.1 Índices geobotánicos

Los índices de vegetación son herramientas fundamentales para analizar la salud y las características de la vegetación mediante imágenes satelitales. En el ámbito de la geobotánica, y particularmente en la identificación de estructuras relacionadas con escapes de hidrógeno, estos índices permiten detectar cambios en el tipo, densidad y estado de la vegetación.

La importancia de este enfoque radica en que la vegetación actúa como un bioindicador sensible a los fenómenos subterráneos, como la actividad de producción y emisión de hidrógeno. Estos procesos pueden alterar significativamente las propiedades del suelo, la disponibilidad de nutrientes y agua, y provocar respuestas fisiológicas en las plantas, proporcionando valiosas pistas sobre los procesos geoló-

gicos subyacentes y las dinámicas del ecosistema. En este estudio, los índices fueron generados a partir de imágenes obtenidas por sensores multispectrales de los satélites Landsat 8 y Sentinel-2, con resoluciones espaciales de 30 m y 10 m, respectivamente. Estas imágenes permiten por las bandas espectrales que manejan un amplio análisis de índices geobotánicos.

Para la zona de estudio se analizaron los siguientes índices:








ÍNDICE	DESCRIPCIÓN	INTERPRETACIÓN
 NVDI (Índice Diferencial Normalizado de Vegetación)	Índica la salud de la vegetación. Valores altos (~0.8-1) representan vegetación densa y saludable.	Los valores altos indican la presencia de vegetación.
 EVI (Índice de Vegetación Mejorado)	Más sensible que el NDVI en áreas densas. Usualmente: G=2.5, C1=6, C2=7.5, L=1.	Los valores altos indican la presencia de biomasa foliar.
 SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo)	Similar al NDVI, pero corrige la influencia del suelo. L generalmente es 0.5	Valores altos indican la presencia de vegetación, incluso en suelos con alta reflectancia.
 ARVI (Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera)	Corrige el NDVI por efectos atmosféricos utilizando una banda azul.	Valores altos indican la presencia de vegetación, incluso en condiciones atmosféricas adversas.
 NDWI (Índice Diferencial Normalizado de Agua)	Identifica cuerpos de agua y monitorea cambios hídricos.	Los valores altos indican la presencia de agua.
 GLI (Índice de Verde Relativo)	Evalúa la cantidad de vegetación verde.	Los valores altos indican la presencia de clorofila.
 GNDVI (Índice de Vegetación de Diferencial Normalizada de Verdor)	Valores altos indican la presencia de vegetación, incluso en condiciones atmosféricas adversas.	Valores altos indican la presencia de vegetación, incluso en condiciones atmosféricas adversas.

Tabla 2. Índices geobotánicos utilizados en la zona de estudio.

6.2 Ventanas de caracterización climática (invierno y verano)

La influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) en el desplazamiento de las bandas de lluvia es un factor clave para entender la estacionalidad de las precipitaciones en Colombia, y por ende, para estudios empleando técnicas de sensoramiento remoto.

Durante los meses de invierno boreal, la ZCIT se desplaza hacia el sur, alejándose de la región Caribe y la zona Andina. Este desplazamiento genera un periodo seco en amplias zonas del país, incluyendo las áreas de nuestro interés.

En la región de Sinú-San Jacinto y el Valle Inferior del Magdalena, la disminución de las lluvias durante diciembre, enero y febrero es particularmente marcada. Estas regiones, caracterizadas por un clima tropical, experimentan una pronunciada estacionalidad, con una marcada diferencia entre la época lluviosa y la seca.

En la zona del Cinturón del Cauca y Occidente de Antioquia, la topografía montañosa modula el patrón de precipitación, generando variaciones locales. Sin embargo, a pesar de estas particularidades, también se observa una reducción significativa de las lluvias durante los meses de invierno boreal.

Por su parte, el suroccidente colombiano presenta un patrón similar, con una disminución de las precipitaciones durante los meses de diciembre, enero y febrero. Esta estacionalidad, aunque menos marcada que en otras regiones, es suficiente para generar un periodo seco que facilita la realización de las actividades propuestas en el proyecto.

Considerando lo anterior, el subproyecto 3 identificó periodos lluviosos y secos óptimos para realizar las actividades de exploración y evaluación en las zonas de interés. Un análisis detallado del clima en el Sinú-San Jacinto, Valle Inferior del Magdalena, Cinturón del Cauca–Occidente de Antioquia y Suroccidente colombiano revela que los meses de diciembre, enero y febrero ofrecen las condiciones más secas.

La marcada reducción de las precipitaciones durante estos meses minimiza las interferencias atmosféricas, facilitando la obtención de datos precisos a través de sensores remotos. Además, la estabilidad climática permite planificar y ejecutar las operaciones de manera más eficiente, asegurando el éxito del proyecto.

6.3 Valores medios índices geobotánicos

El cálculo de valores medios de imágenes de índices geobotánicos es un procedimiento fundamental para resumir la información contenida en grandes volúmenes de datos espaciales, permitiendo obtener una visión general del comportamiento y la variabilidad de los índices vegetales a lo largo de un área de estudio. En este caso, se aplicó el cálculo de promedios de índices vegetales desde 2013 hasta 2023 para los índices calculados tanto para la temporada invierno como verano, a continuación a manera de ejemplo podemos observar el índice NDVI calculado para las temporadas de invierno (figura 33) y verano (figura 34) y finalmente la media calculada para el mismo (figura 35) a partir de imágenes

Sentinel2, la cual permite suavizar anomalías por eventos estacionales extremos (como El Niño o La Niña) y obtener una visión más robusta del comportamiento de la vegetación en el tiempo asegurando una representación más equilibrada del ciclo vegetativo anual. A partir de la imagen de la media del índice es posible observar colores desde el rojo al verde en donde el verde oscuro representa vegetación densa y saludable (bosques, selvas), el amarillo vegetación escasa y el rojo zonas sin vegetación (agua, superficies artificiales o suelo desnudo).

También es posible observar hacia que zonas del área de estudio predominan estos valores teniendo como resultado que la vegetación alta predomina en casi toda el área, indicando cobertura vegetal persistente especialmente en el pacífico (Chocó, Valle del Cauca) y la parte baja del Magdalena medio y sur de Bolívar; así mismo las zonas con menor vegetación se presentan sobre áreas urbanas como Cali y otros núcleos urbanos visibles como pequeñas manchas rojas así como en algunas zonas al norte del área de estudio posiblemente por presencia de sabanas, cultivos o degradación del suelo.



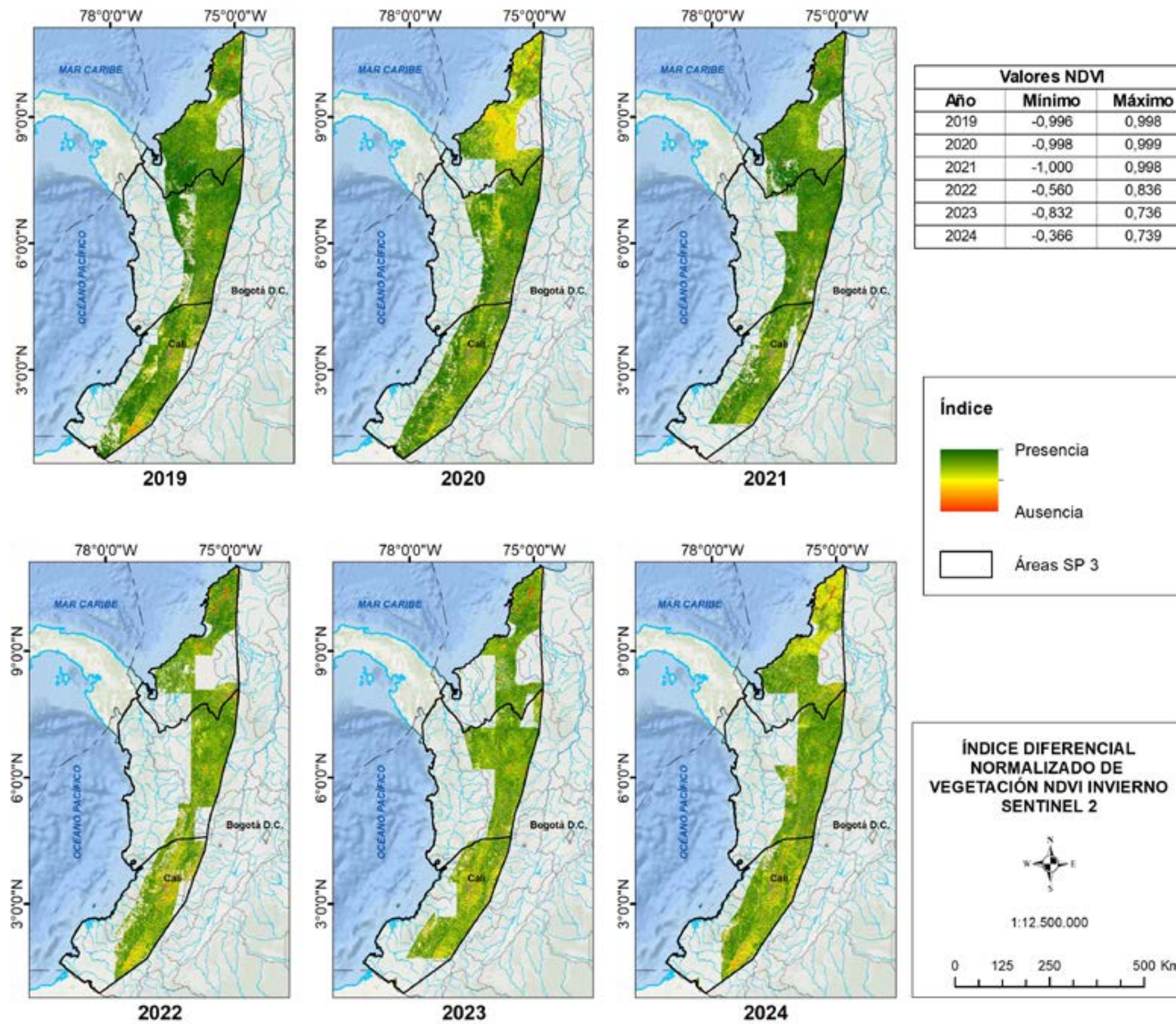


Figura 33. Índice diferencial normalizado de vegetación NDVI para la temporada invierno de los años 2019 a 2024 calculados con las imágenes Sentinel2.

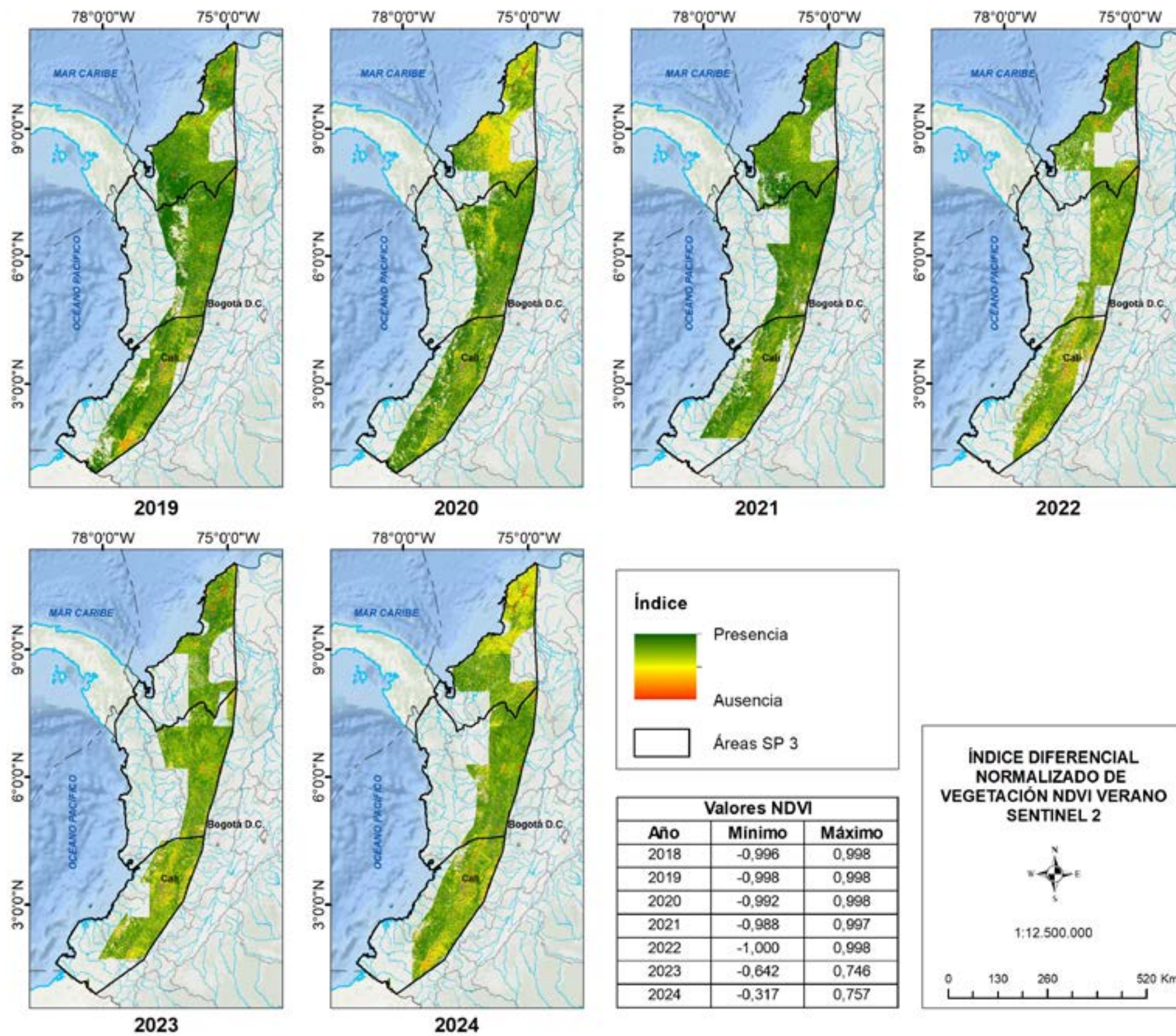


Figura 34. Índice diferencial normalizado de vegetación NDVI para la temporada invierno de los años 2019 a 2024 calculados con las imágenes Sentinel2.

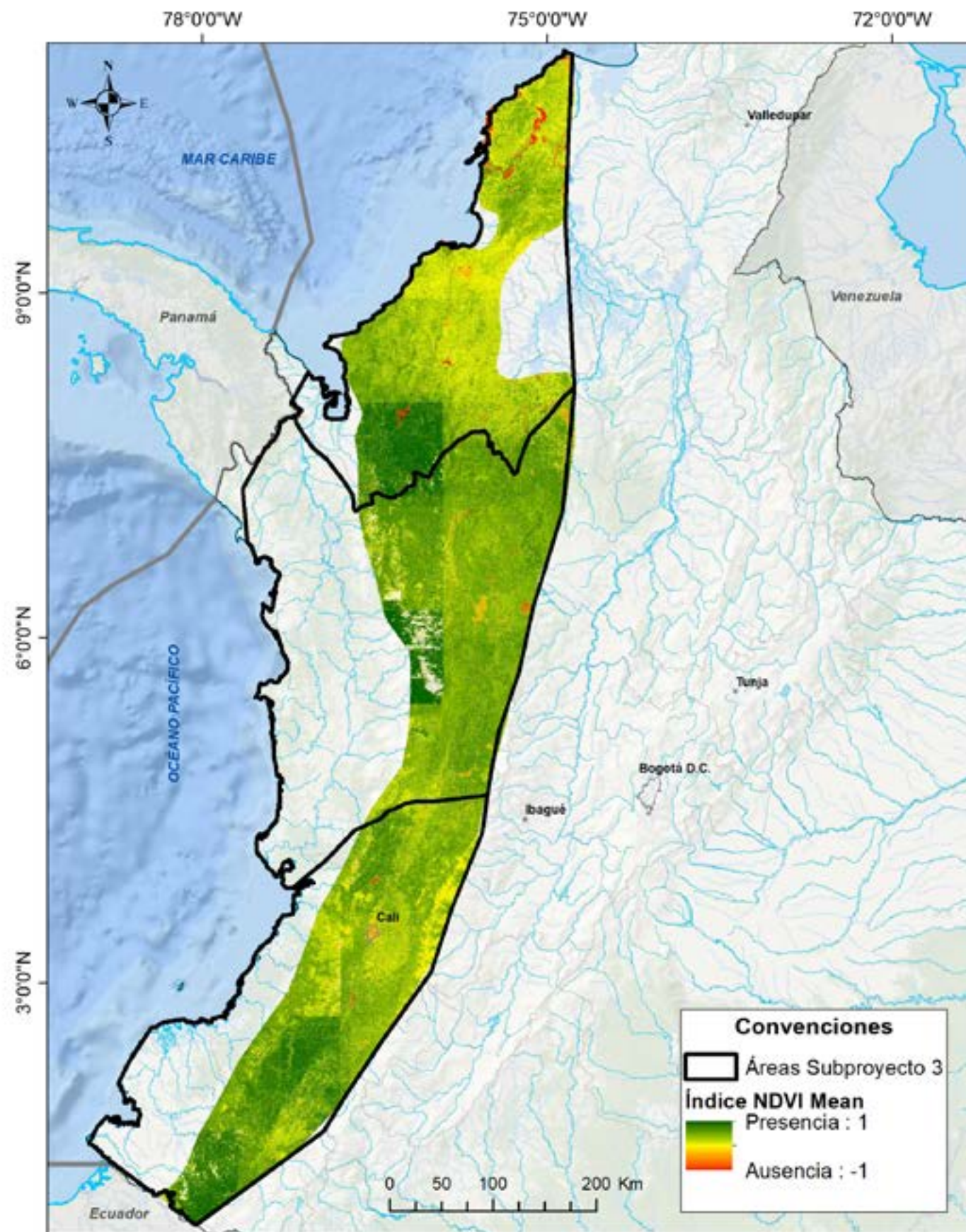


Figura 35. Media del Índice diferencial normalizado de vegetación NDVI para la temporada invierno de los años 2013 a 2024 calculados con las imágenes Sentinel2.

De la misma forma, a manera de ejemplo podemos observar el índice NDVI calculado para las temporadas de invierno (figura 36) y verano (figura 37) y finalmente la media calculada para el mismo (figura 38) a partir de imágenes Landsat 8.

A partir de los resultados de la media del índice es posible observar colores desde el verde al rojo en donde el verde oscuro representa vegetación densa y saludable (bosques, selvas) la cual predomina en el litoral pacífico y la región del Alto Magdalena y algunas zonas del caribe, el rojo y naranja que se concentra en áreas aisladas de vegetación escasa presentes en el norte y en el Suroccidente posiblemente asociadas a urbanización, degradación o agricultura intensiva o zonas de transición ecológica y algunas áreas "en blanco" que indican ausencia de datos Landsat 8 por persistencia de nubes.

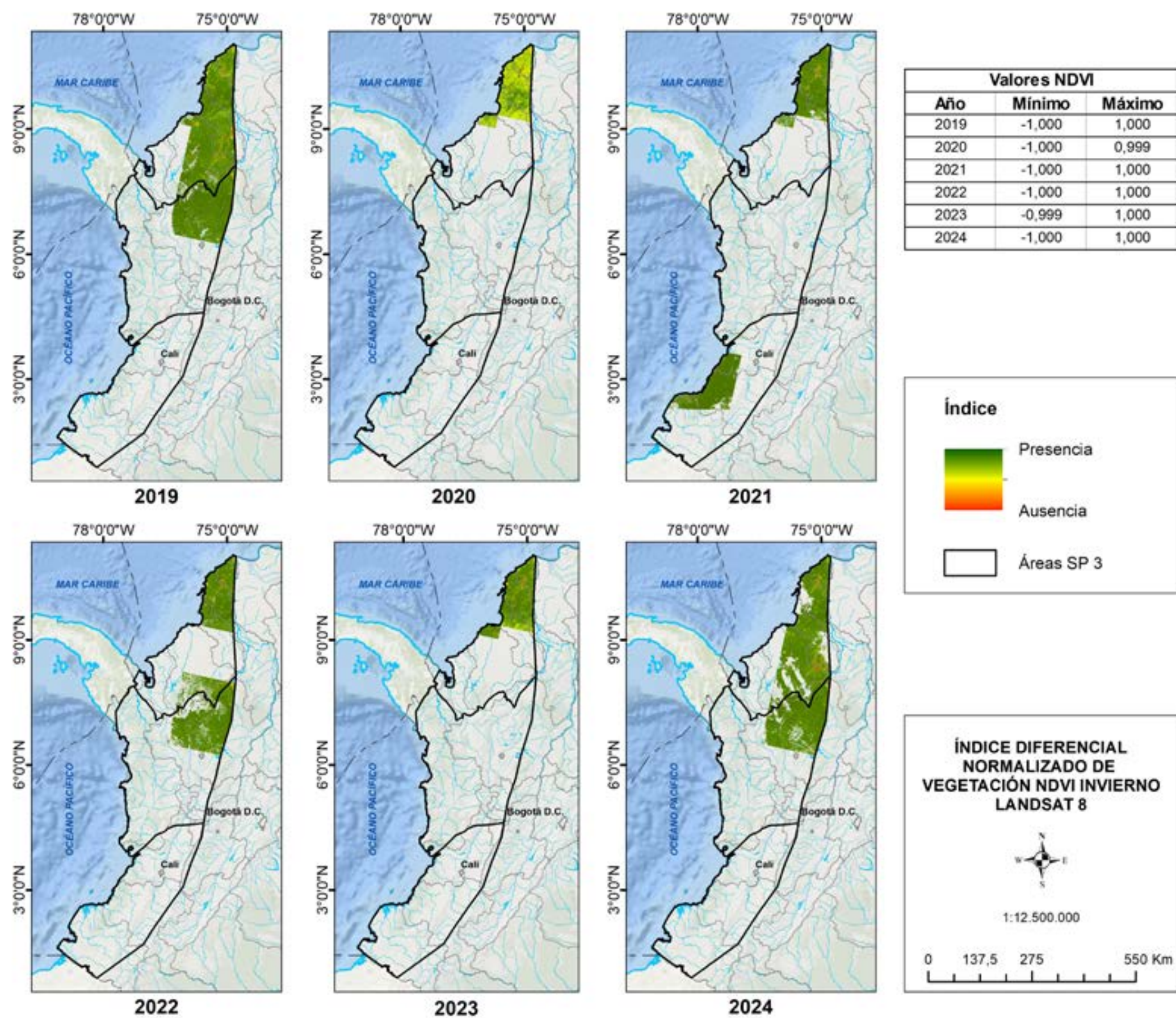


Figura 36. Índice diferencial normalizado de vegetación NDVI para la temporada invierno de los años 2019 a 2024 calculados con las imágenes Landsat8.

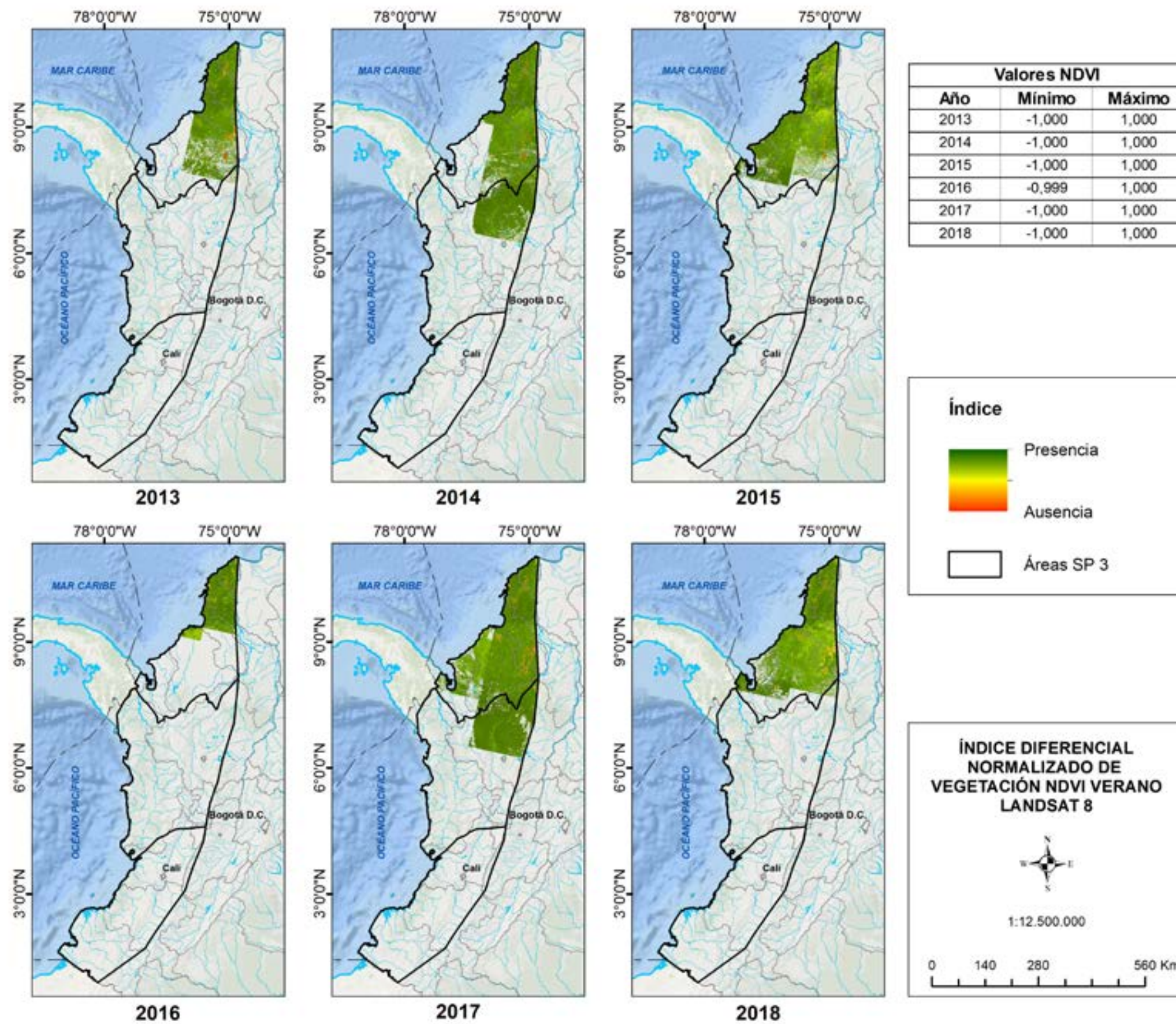


Figura 37. Índice diferencial normalizado de vegetación NDVI para la temporada invierno de los años 2019 a 2024 calculados con las imágenes landsat8.

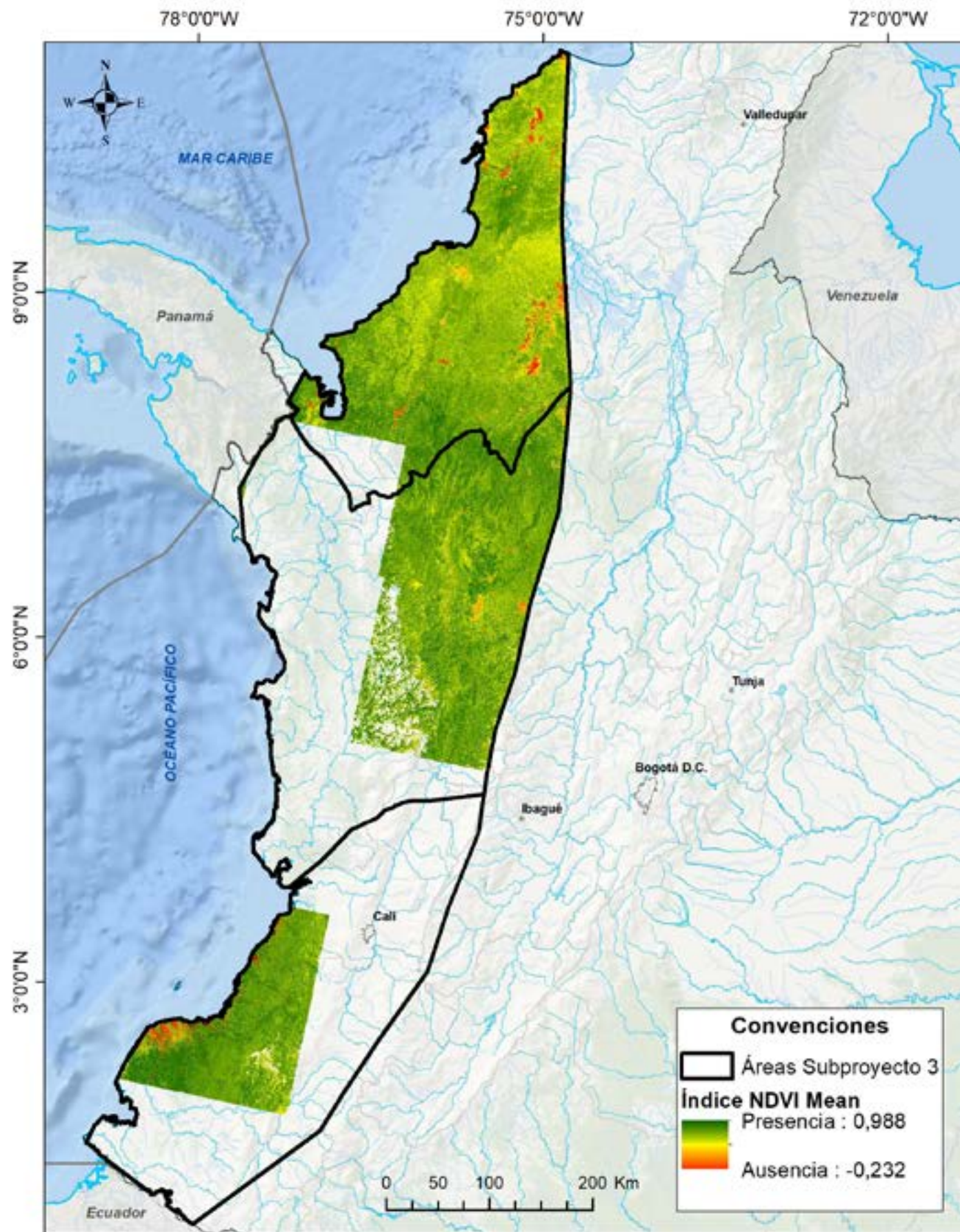


Figura 38. Media del Índice diferencial normalizado de vegetación NDVI para la temporada invierno de los años 2013 a 2024 calculados con las imágenes Landsat8.

6.4 Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (ACP) es una técnica estadística que se utiliza para reducir la dimensionalidad de los datos al identificar combinaciones lineales de variables originales que explican la mayor cantidad de varianza.

En el caso de los índices geobotánicos, el ACP permite combinar y analizar múltiples índices derivados de imágenes satelitales para identificar patrones y anomalías que puedan estar relacionadas con Círculos de Hadas y estructuras de escape de hidrógeno. Para el caso del estudio el cálculo de ACP se utilizó para evaluar las variaciones espaciales y temporales de índices como el NDVI, NDWI, EVI, entre otros.

Al combinar la información de múltiples índices, el ACP permite identificar patrones clave, como zonas donde la vegetación presenta respuestas diferentes debido a factores ambientales o geotérmicos. Este enfoque es particularmente valioso para priorizar áreas de interés y resaltar las características distintivas de cada región estudiada.

Los resultados del ACP suelen representarse mediante mapas de colores que visualizan la distribución de los principales patrones detectados.

Las tonalidades en estos mapas reflejan distintas combinaciones de índices de vegetación, facilitando la interpretación de las dinámicas vegetativas en el área de estudio.

A partir de las tonalidades observadas en los bloques priorizados, es posible realizar interpretaciones preliminares sobre las características ambientales y geotérmicas de la región:

- Tonalidades cálidas (rojo, naranja, amarillo): indican áreas con mayor actividad o cambios vegetativos significativo.
- Tonalidades frías (azul, verde): Representan áreas de vegetación más estable, menor actividad o suelos descubiertos.
- Tonalidades neutras (grises): Señalan regiones con poca variación o patrones uniformes, donde los índices no destacan anomalías específicas.
- Tonalidades magenta: Resaltan áreas con combinaciones específicas de índices, que podrían asociarse a condiciones mixtas como vegetación en transición, suelo expuesto con vegetación dispersa o zonas alteradas por cambios ambientales sutiles.

Estas tonalidades permiten identificar rápidamente anomalías o patrones particulares, guiando el análisis hacia áreas con dinámicas vegetativas interesantes (figura 39).

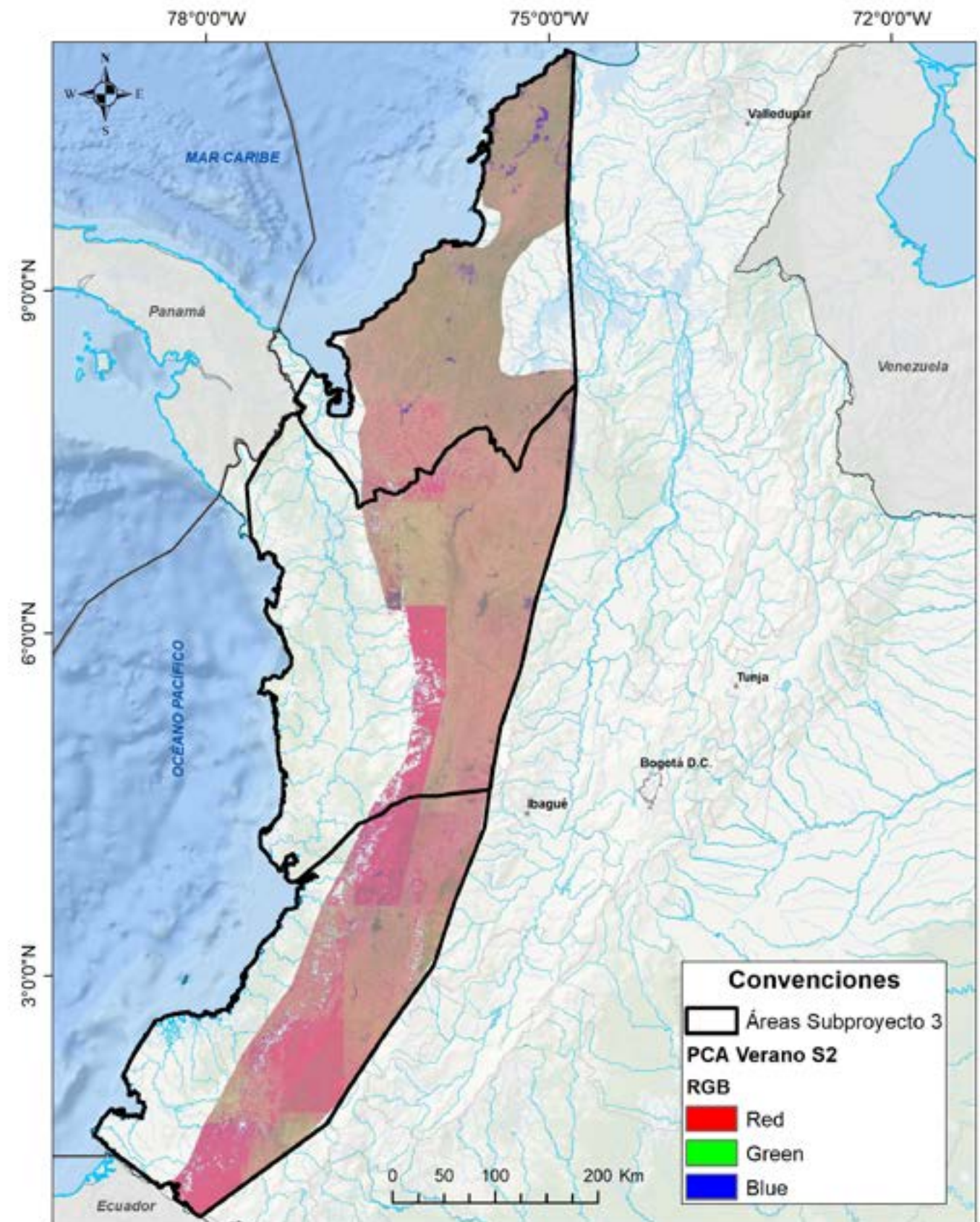
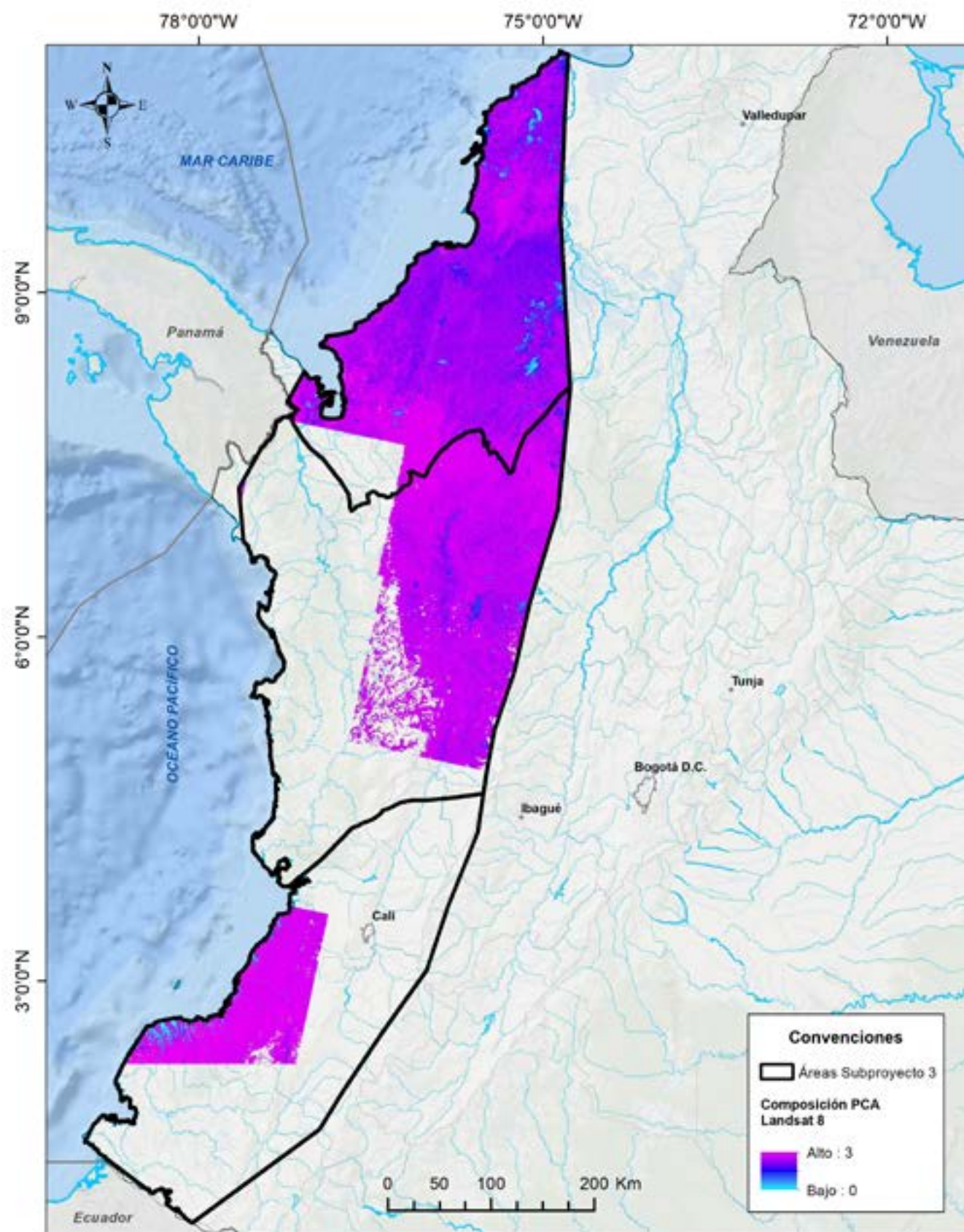


Figura 39. Combinaciones de índices de vegetación, características ambientales y geotérmicas.

6.5 Clasificación no supervisada / supervisada

La clasificación de imágenes de satélite es un proceso que consiste en analizar una imagen de satélite y asignar una "etiqueta" o "clase" a cada píxel, identificando así diferentes características del terreno, en este caso, características de la vegetación que pueden extraerse de los índices geobotánicos previamente calculados, este proceso se hace a través del entrenamiento de la máquina aplicando un algoritmo para asignar una clase a cada píxel. Existen dos tipos de clasificación, la supervisada y la no supervisada, en la primera se utilizan muestras de entrenamiento (áreas donde se sabe qué clase hay) para enseñar al algoritmo a identificar las clases y en la segunda el algoritmo busca patrones en los datos y agrupa los píxeles en función de sus similitudes.

Para la caracterización de estructuras de escape se partió de la base de la media de los índices (ARVI, EVI, GLI, NBRI, NDVI, NDWI y SAVI) calculados para los satélites Landsat 8 y Sentinel 2, con la finalidad de poder determinar rangos característicos asociados a fairy circles, el principio general consistió en la cartografía de observaciones de zonas potenciales con unidades geológicas que presentan rasgos favorables para la presencia de hidrogeno natural, junto con rasgos característicos de serpentización, ofiolitas, carbón y las facies ricas en hierro, así como zonas de subducción a lo largo de la costa del Pacífico; a partir de la delimitación de estas zonas se utilizó el método de CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA DE GRUPOS ISO, el cual consiste en realizar una clasificación de máxima verosimilitud en un conjunto de bandas ráster.

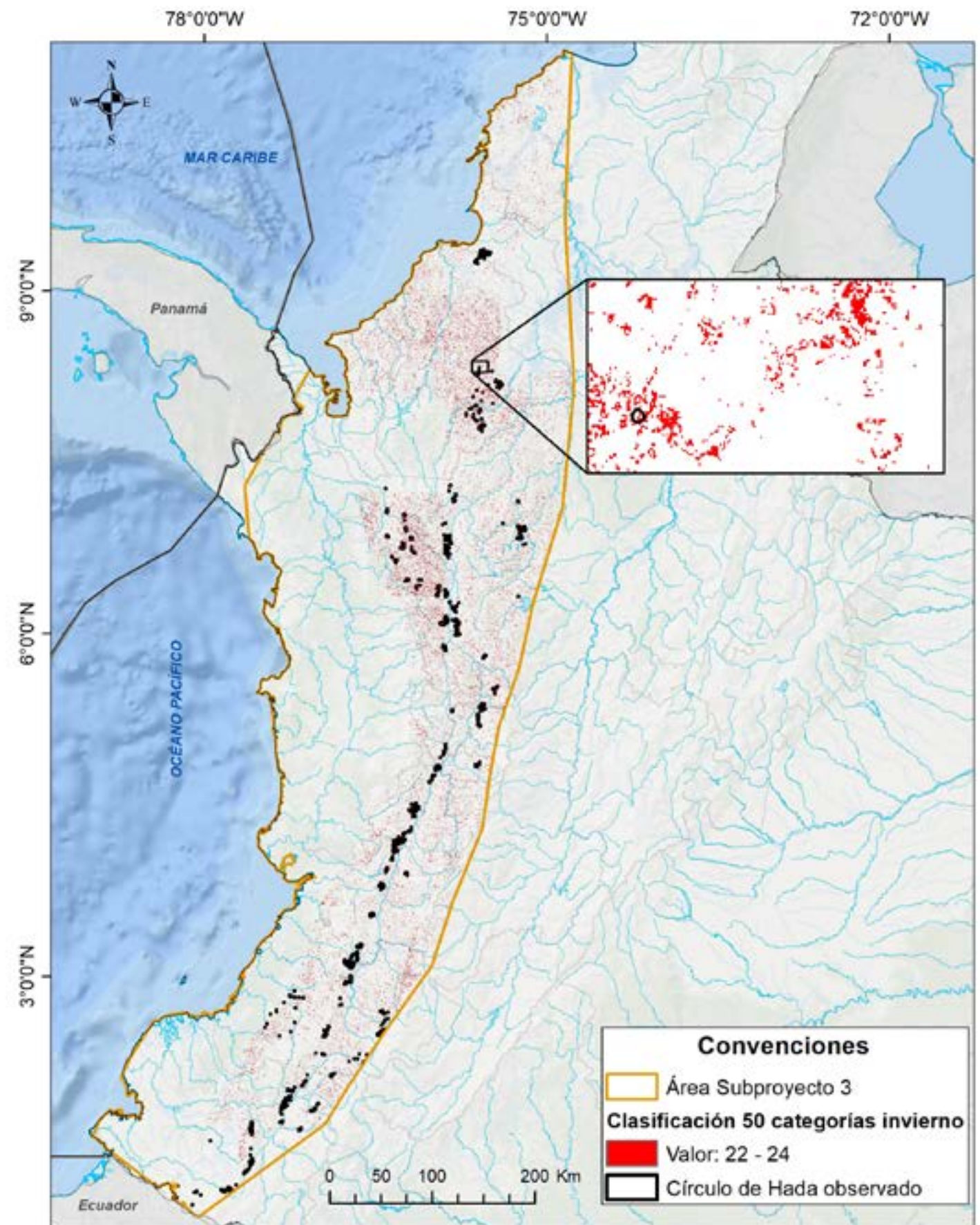


Figura 40. Zonas potenciales con unidades geológicas y zonas de subducción, Costa del Pacífico.

Teniendo en cuenta los análisis realizados para los cálculos de índices geobotánicos ARVI, EVI, GLI, NBRI, NDVI, NDWI y SAVI generados para los satélites LANDSAT 8 y SENTINEL 2, se realizó una clasificación supervisada, que permitiría determinar de una manera más acertada zonas de anomalías asociadas a hidrógeno natural, con el mismo principio que se tuvo en cuenta en la clasificación no supervisada, tomando como referencia las observaciones de los círculos de hadas realizadas, para el entrenamiento de muestras a calcular. Para el respectivo análisis se utilizó el módulo Train Support Vector Machine Classifier (Image Analyst) del software Arcgis Pro.

El clasificador SVM (Máquinas de Soporte Vectorial) es un método de clasificación supervisado ampliamente usado en la investigación para el análisis de imágenes. Es particularmente adecuado para trabajar con datos de imágenes segmentadas, aunque también se adapta bien a imágenes convencionales. En esencia, esta técnica clasifica cada píxel de la imagen basándose en los patrones de entrenamiento proporcionados, en este caso los círculos de hadas observados.

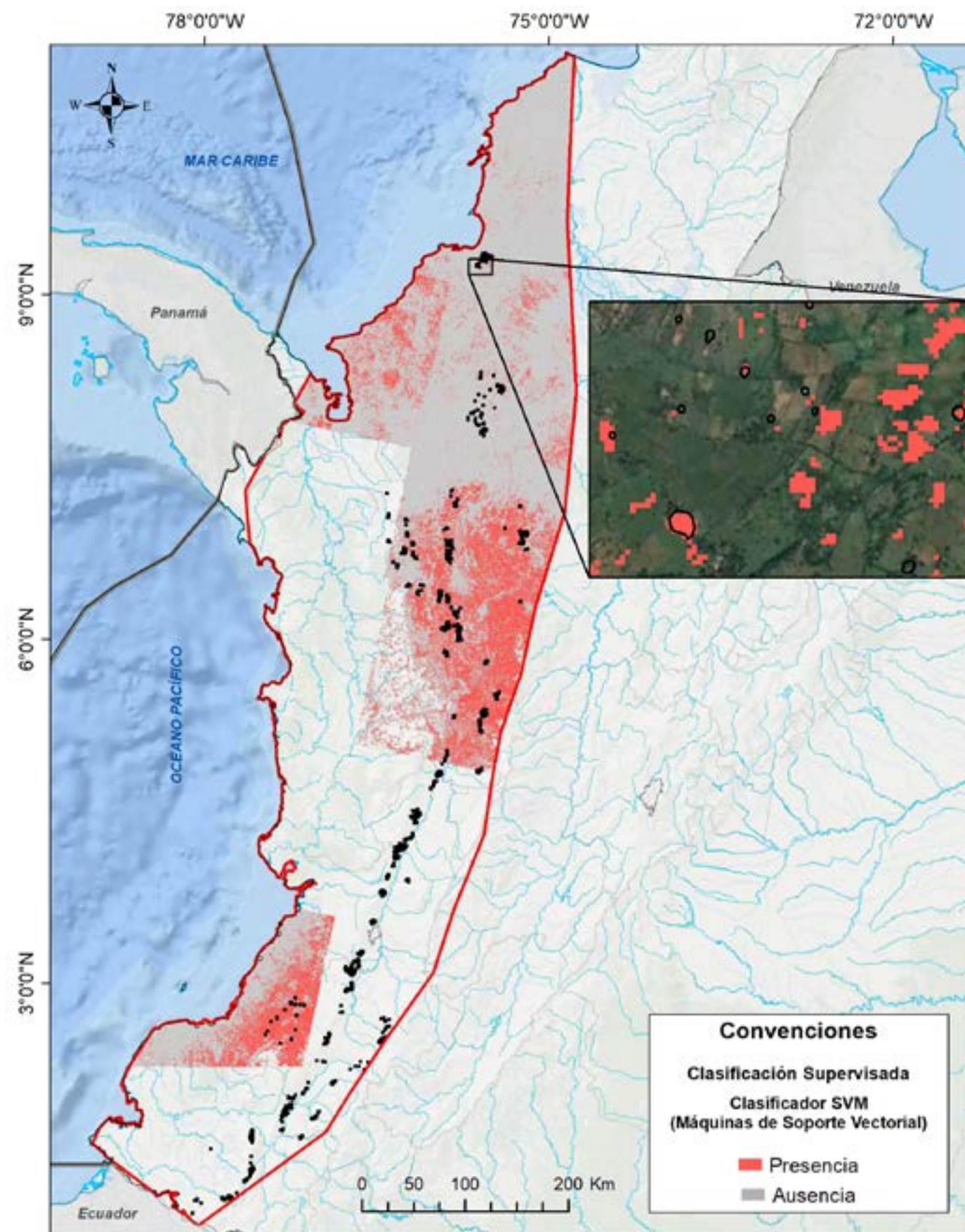


Figura 41. Zonas de anomalías asociadas a hidrógeno natural y círculos de hadas.

7. CARTOGRAFÍA DE TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL SUELO

La estimación de la Temperatura Superficial de la Tierra (LST) a partir de imágenes de satélite se basa en datos espectrales obtenidos en satélites tales como Landsat 8, Landsat 4, Sentinel 3, ASTER, MODIS, entre otros.

El procedimiento se inicia con la obtención de bandas espectrales térmicas, ajustes geométricos y atmosféricos, y la conversión de números digitales a valores de radiancia, y cálculo del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) para corregir la temperatura de brillo y obtener la LST final. Esta estimación de LST es fundamental en la búsqueda de hidrógeno natural, porque puede indicar la presencia de procesos geológicos asociados con su emisión.

Las anomalías térmicas detectadas a través de LST pueden correlacionarse con fracturas en superficie, fuentes de calor geotérmico o cambios en la vegetación debido al escape de gas.

Estas características permiten identificar posibles zonas de interés para la exploración de hidrógeno natural en regiones específicas, optimizando la investigación futura. Las anomalías térmicas detectadas a través de LST se complementan con mediciones en campo (in-situ), que permiten comprender y validar la información de los datos obtenidos de forma remota.

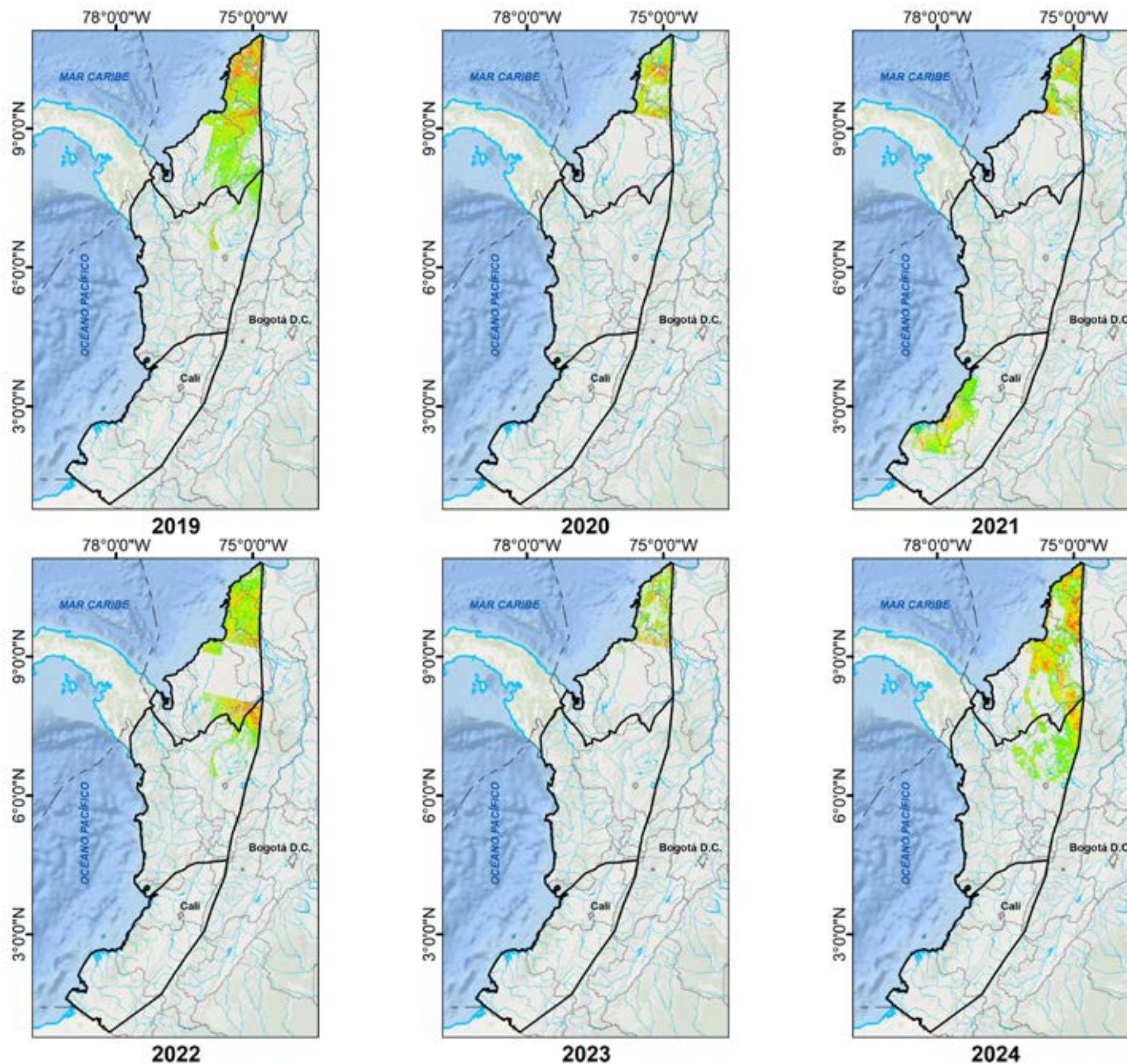
Estas mediciones en campo son fundamentales para garantizar la validez y aplicabilidad de los datos satelitales, transformando las observaciones remotas en herramientas de análisis fiables y precisas.

La (Figura 42) muestra el diagrama de flujo para el cálculo de LST con imágenes Landsat 8, cuyos resultados se aprecian en las (Figura 43 y Figura 44) para los períodos de invierno (húmedo) y verano (seco) de la zona de estudio.



Figura 42. Diagrama de flujo para la estimación de LST con imágenes Landsat 8.

7. CARTOGRAFÍA DE TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL SUELO



La temperatura cinética es una medida del calor asociado al movimiento aleatorio de las moléculas en un sistema físico. En términos más simples, es la temperatura verdadera de un objeto o superficie, que está relacionada directamente con su energía interna debido al movimiento molecular.

La temperatura cinética derivada de imágenes satelitales, como las de ASTER, puede ser una herramienta útil para detectar escapes de hidrógeno debido a las anomalías térmicas que pueden generar estos procesos en la superficie terrestre. Los escapes de hidrógeno desde el subsuelo, como ocurre en procesos geológicos o a través de fallas, pueden causar alteraciones en la temperatura superficial debido a:

- Reacciones químicas exotérmicas en el subsuelo (por ejemplo, oxidación del hidrógeno al entrar en contacto con minerales u oxígeno).
- Cambios en las propiedades térmicas del suelo o roca (mayor conductividad térmica o calentamiento localizado).
- Procesos biológicos relacionados con bacterias que metabolizan el hidrógeno, generando calor.

Valores LST		
Año	Mínimo	Máximo
2019	34,838	46,023
2020	43,297	55,020
2021	33,593	51,510
2022	33,520	44,205
2023	40,135	48,017
2024	28,515	46,295

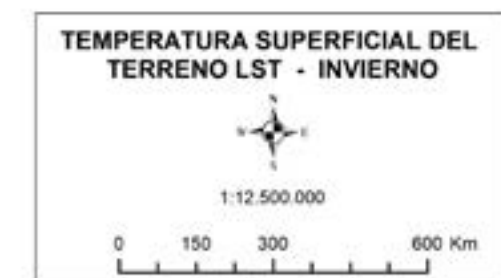
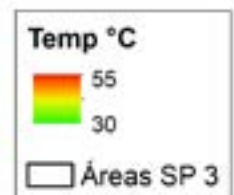
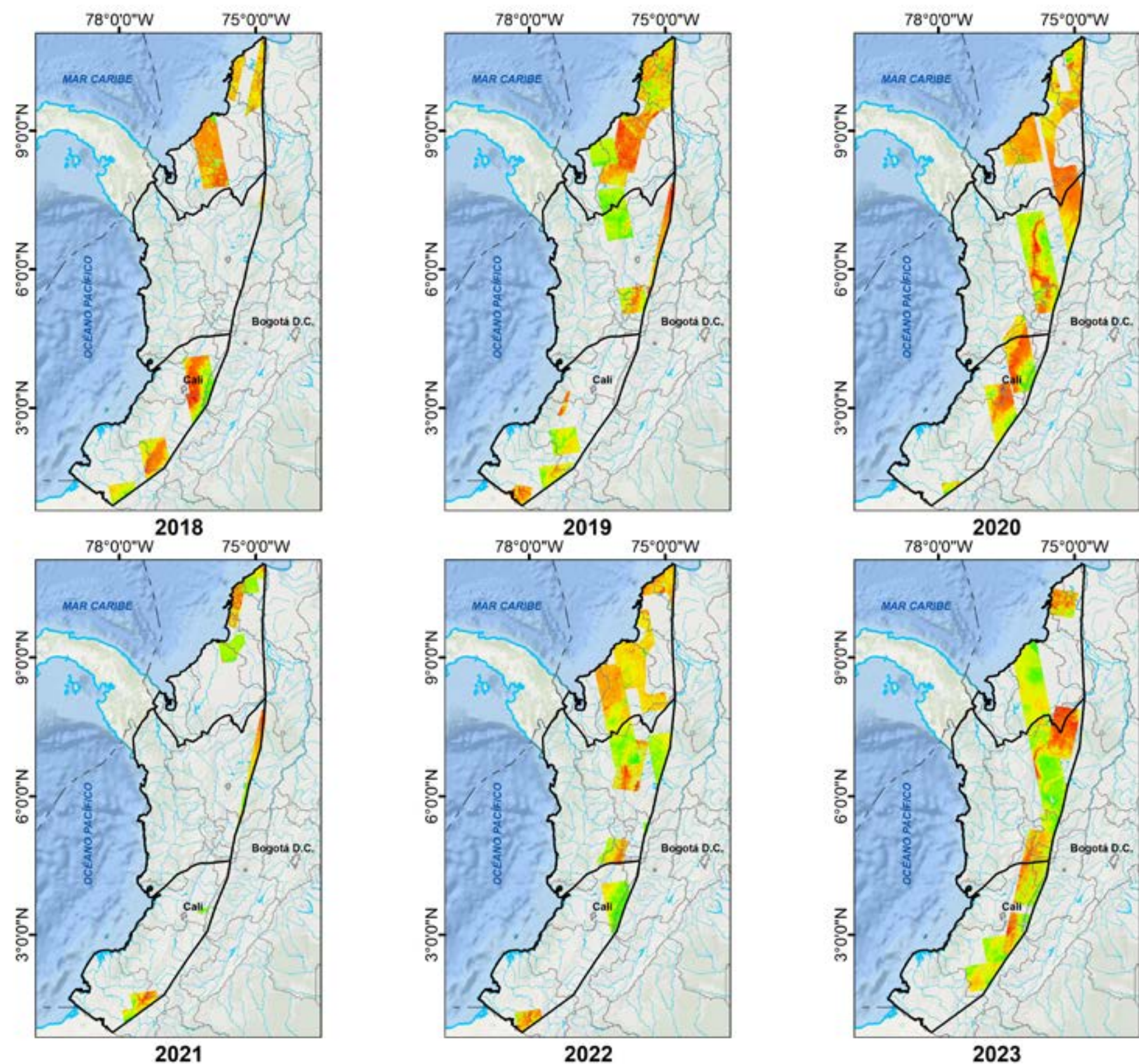


Figura 43. Temperatura superficial del suelo para el período de invierno (época húmeda), 2019-2024 empleando imágenes de Landsat 8.

7. CARTOGRAFÍA DE TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL SUELO



Estas alteraciones se manifiestan como anomalías térmicas detectables en las imágenes infrarrojas térmicas de satélite.

El instrumento ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) a bordo del satélite Terra de la NASA es una herramienta valiosa para obtener la temperatura cinética de la superficie terrestre, adquiridas en varias bandas del infrarrojo, en el día o en la noche, midiendo la radiación térmica emitida por la superficie terrestre. La figura 43 y la figura 44 muestra las temperaturas anuales de la zona de estudio para el período 2019-2024, limitado debido al cubrimiento parcial en la zona de interés de estas imágenes.

Valores Temperatura Cinética		
Año	Mínimo	Máximo
2018	0,050	59,050
2019	0,950	78,350
2020	0,050	50,450
2021	0,050	76,750
2022	0,050	74,050
2023	0,850	97,850



Figura 44. Temperatura cinética de la superficie desde 2018 a 2023.

Persistencia de la temperatura superficial del suelo

Como se mencionó previamente, La LST es un elemento fundamental para la identificación de anomalías térmicas en la superficie terrestre empleando imágenes de satélite, las cuales pueden estar asociadas con fenómenos geotérmicos, filtraciones de gases o recursos como el hidrógeno. Sin embargo, al analizar los cambios térmicos presumiblemente relacionados con el hidrógeno, son muy sutiles y graduales, lo que hace que su detección a través de un solo conjunto de datos no sea muy evidente, por lo cual se emplea la técnica de persistencia LST, que permite observar patrones térmicos a lo largo del tiempo, lo cual permite identificar tendencias estables o recurrentes.

Dentro de los métodos existentes, se emplearon el monocanal y el bicanal, el primero usando una sola banda térmica, y el segundo dos bandas espectrales, una térmica y otra óptica. Sin embargo, la resolución espacial de los datos limita la detección de estructuras pequeñas, como lo son los círculos de hadas, que son áreas muy pequeñas comparadas con el área cubierta por un píxel térmico, como se aprecia en la (Figura 45).

Los polígonos rojos indican posibles círculos de hadas, distribuidos irregularmente en la zona de estudio. La variación de las tonalidades, de verde a amarillo y rojo, indican variaciones superficiales, con la tonalidad azul a verde señalando temperaturas bajas.

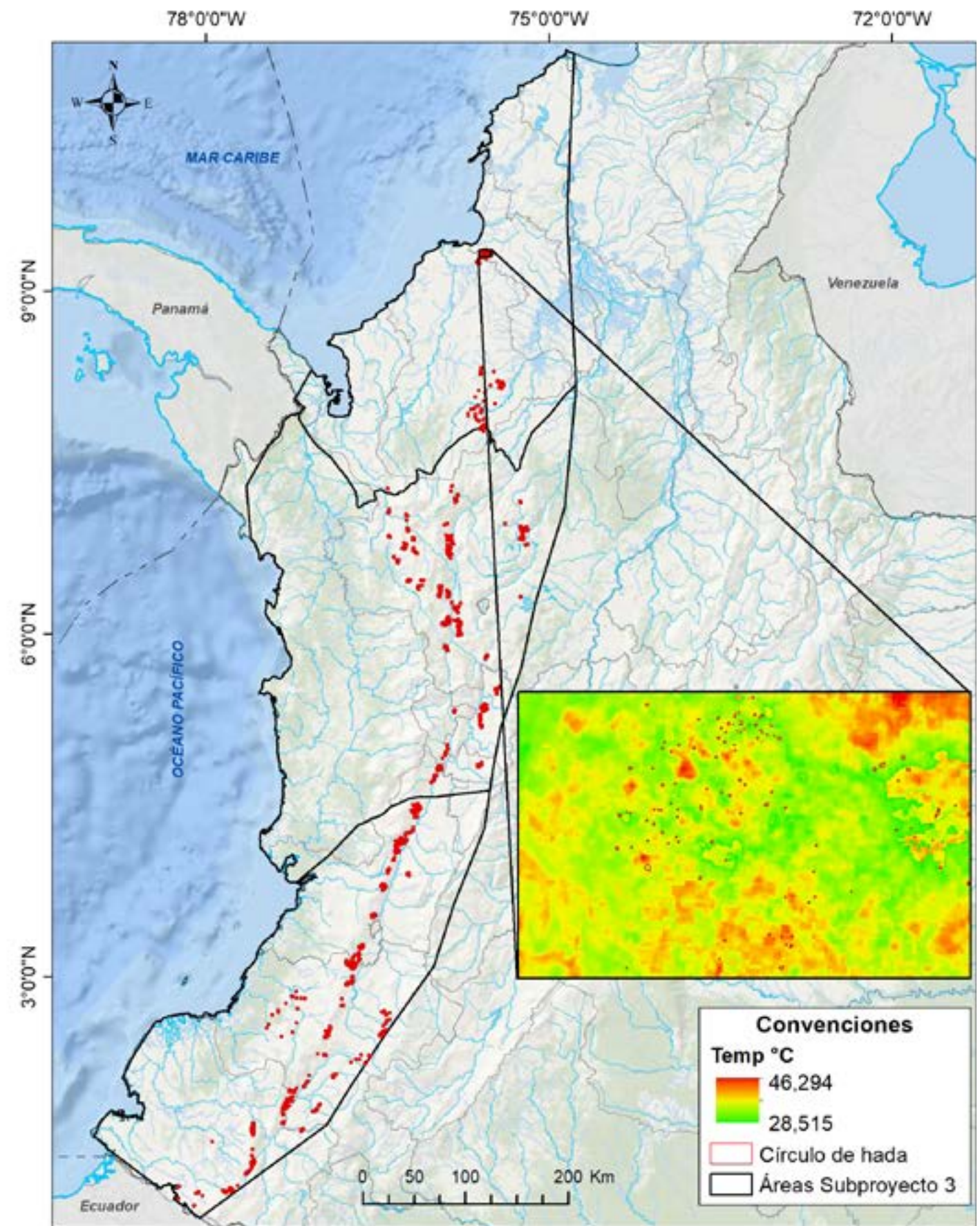


Figura 45. Anomalías térmicas observadas a partir de imágenes Landsat en la zona de estudio empleando el método bicanal.

El uso combinado de las imágenes de Google Earth con las imágenes raster de la temperatura permiten identificar las relaciones que puedan existir entre las características visibles del terreno y las variaciones térmicas detectadas; la (Figura 46) muestra los respectivos círculos de hadas.

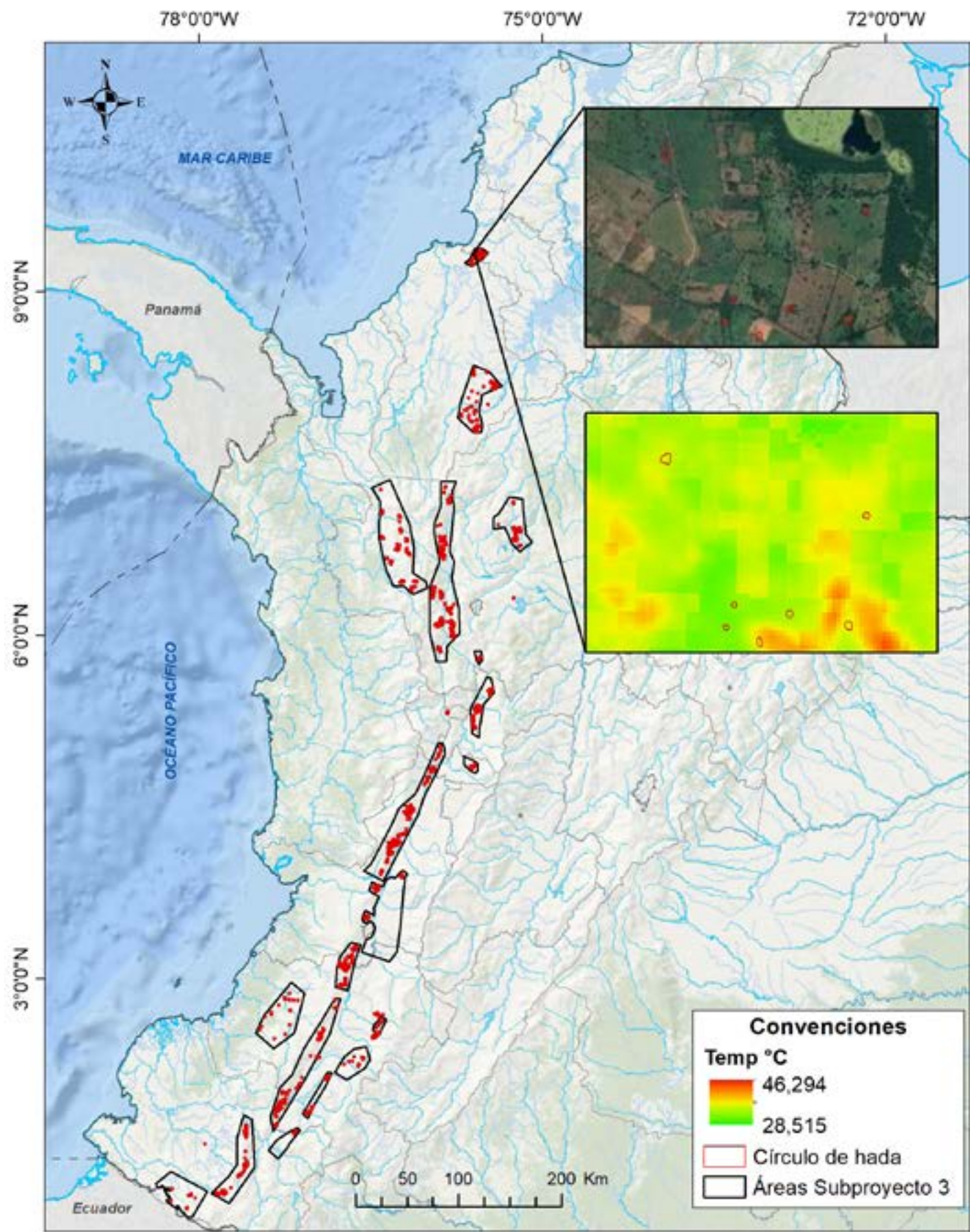
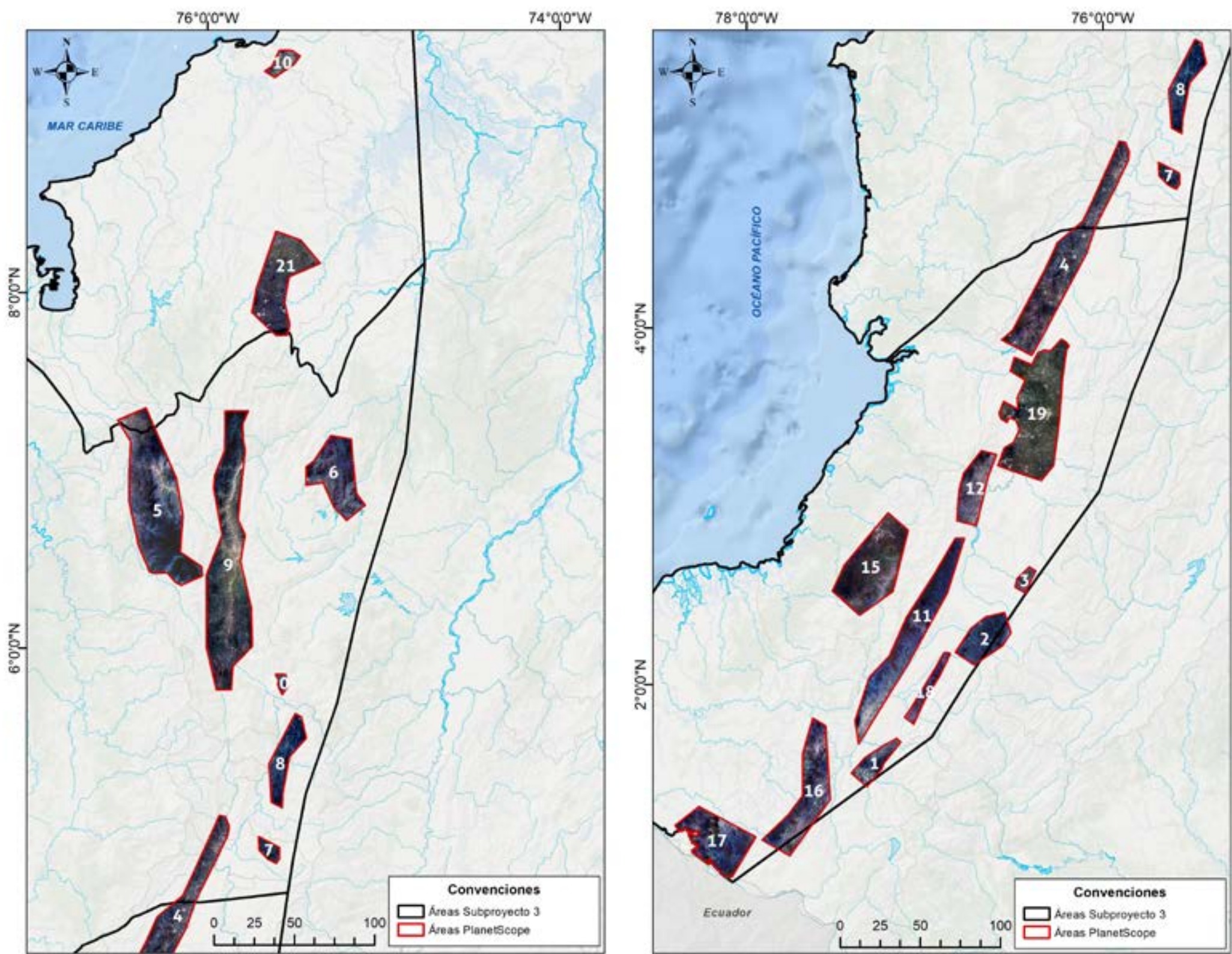


Figura 46. Anomalia térmica bicanal a partir de Landsat 8 y círculos de hadas en imagen de Google Earth.

8. ANÁLISIS LOCALIZADO CON IMÁGENES PLANET SCOPE

A partir de los análisis regionales realizados con las imágenes Landsat 8 y Sentinel 2 se definieron polígonos para la realización de análisis más detallados (tabla 3) para los cuales se adquirieron imágenes de Planet Scope para tres temporalidades: T1. de enero a mayo de 2022, T2. de agosto a diciembre de 2022 y T3. de enero a mayo de 2023. En total se adquirieron 162 imágenes de la temporalidad 1, 165 imágenes para la temporalidad 2 y 173 para la temporalidad 3. Los polígonos definidos pueden observarse en la figura 47.



VALIDACIÓN DE ÁREAS PARA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES DE PLANET SCOPE

Nombre	Area_km2
SP3_AOI_1	187,5
SP3_AOI_2	1291,37
SP3_AOI_3	1046,1
SP3_AOI_4	3147,6
SP3_AOI_5	2769,8
SP3_AOI_6	61,5
SP3_AOI_7	563,6
SP3_AOI_8	132
SP3_AOI_9	2064,3
SP3_AOI_10	2263,9
SP3_AOI_11	642,4
SP3_AOI_12	108,7
SP3_AOI_13	1704,3
SP3_AOI_14	1597,9
SP3_AOI_15	628,5
SP3_AOI_16	242,1
SP3_AOI_17	337,3
SP3_AOI_18	1350,6
SP3_AOI_19	1100,7
Área Total (km2)	21240,17

Tabla 3. Áreas definidas para análisis detallado con Imágenes Planet Scope.

8.1. Índices geobotánicos

De la misma forma en que se llevó a cabo el análisis de índices geobotánicos con las imágenes de Sentinel 2 y Landsat 8 se evalúan, se desarrolló el cálculo de índices geobotánicos calculables con las bandas que integran las imágenes de Planet Scope (figura 48).

A partir de esta selección y priorización se calculó los índices geobotánicos para posteriormente construir los respectivos mosaicos en cada una de las áreas. A continuación, se describe a través de un diagrama de flujo el código usado (figura 49).

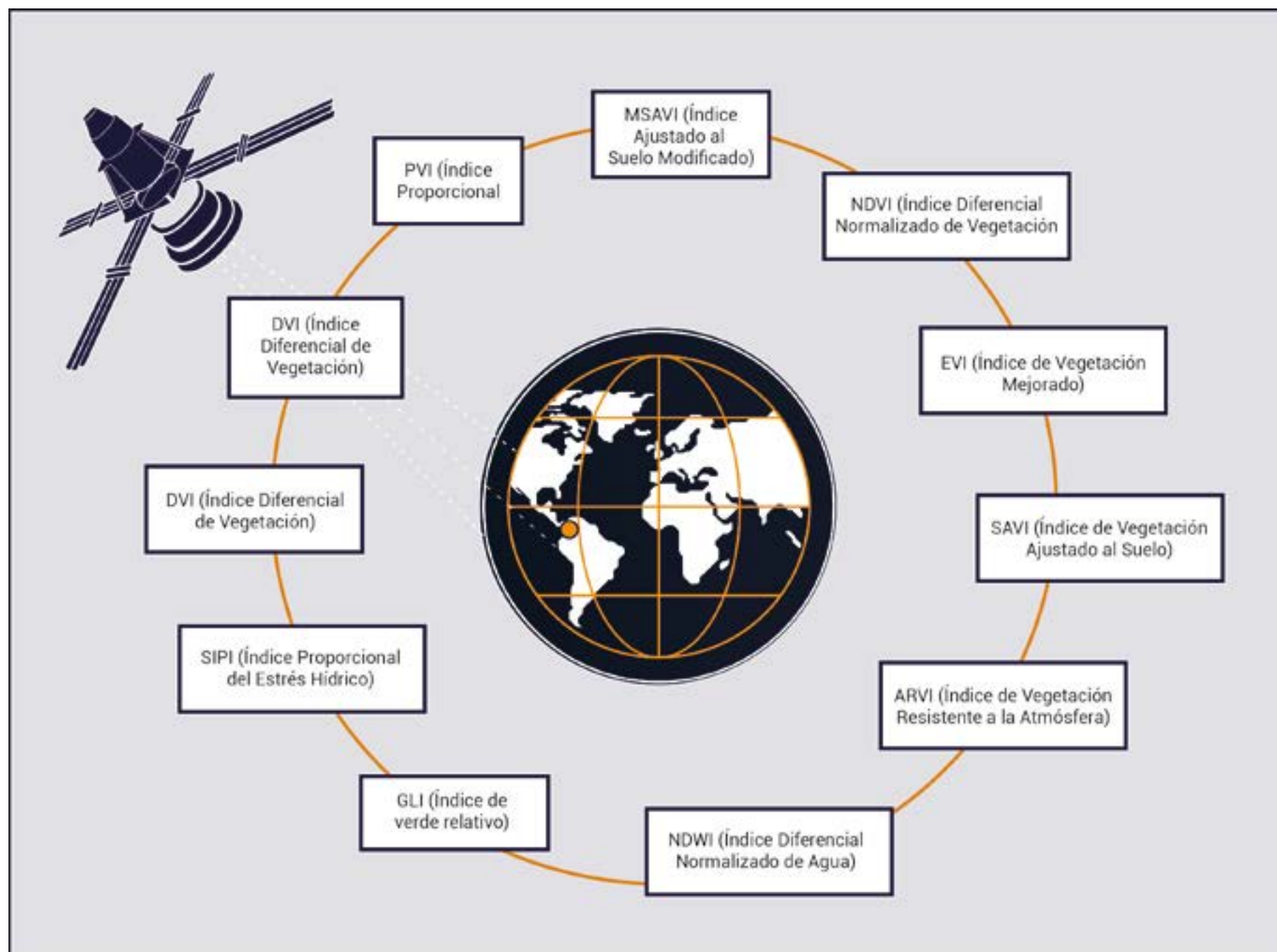


Figura 48. Índices calculados para las imágenes Planet Scope.

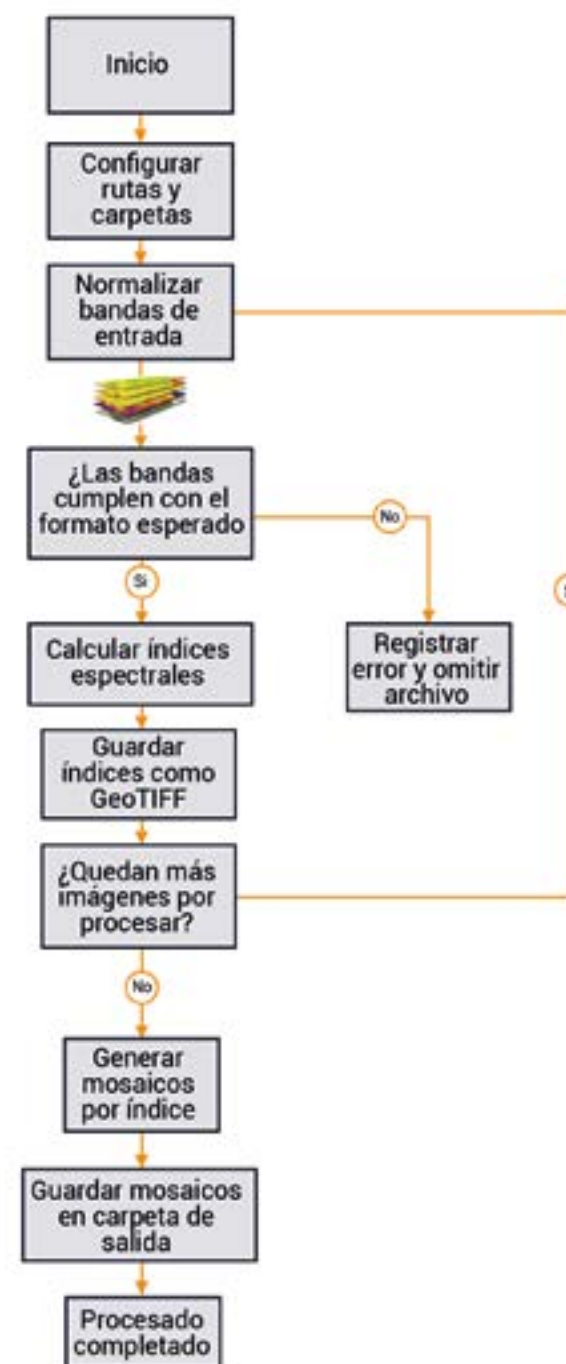


Figura 49. Diagrama de flujo cálculo de índices geobotánicos.

8. ANÁLISIS LOCALIZADO CON IMÁGENES PLANET SCOPE

A manera de ejemplo a continuación podemos observar el resultado de todos los índices Geobotánicos calculado para una de las áreas seleccionadas para análisis Planet Scope, en este caso AOI2 ubicada al sur del departamento de Córdoba.

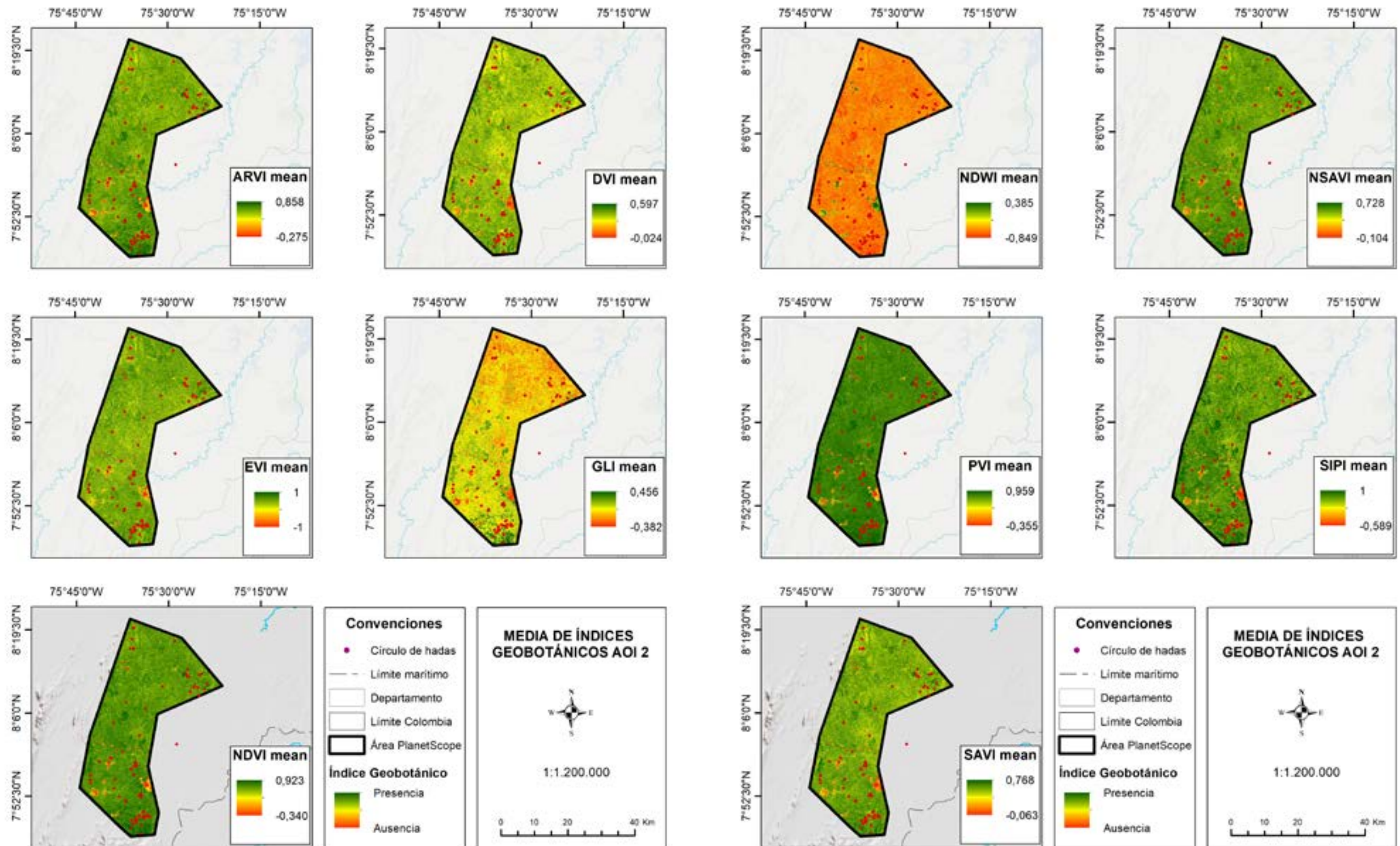


Figura 50. Media de Índices ARVI, DVI, EVI, GLI, NDVI para el área AOI2 en base a las imágenes Planet Scope.

Figura 51. Media de Índices NDWI, NSAVI, PVI, SIPI, SAVI para el área AOI2 en base a las imágenes Planet Scope.

El análisis de los Índices del AOI2 (figuras 50 y 51) se resumen en la tabla que se presenta a continuación (tabla 4).

Índice de Vegetación	DVI (Difference Vegetation Index)
- AOI2 (Global)	El histograma muestra una distribución con una tendencia central cercana a 0.04993, con valores distribuidos entre 0.02 y 0.077, indicando baja variabilidad en la vegetación.
- AOI2 (Círculos de Hadas)	El histograma de círculos de hadas muestra una distribución sesgada hacia la derecha, con una media más baja (~0.04688), indicando menor densidad de vegetación.
Índice de Vegetación	EVI (Enhanced Vegetation Index)
- AOI2 (Global)	El histograma muestra una distribución con una tendencia sesgada hacia la izquierda cerca de 0.11623, valores distribuidos principalmente entre 0.03 y 0.19, indicando baja a moderada variabilidad en la vegetación.
- AOI2 (Círculos de Hadas)	El histograma de círculos de hadas muestra una distribución sesgada hacia la derecha, con una media más baja (~0.11003), lo que indica menor densidad de vegetación.
Índice de Vegetación	GLI (Green Leaf Index)
- AOI2 (Global)	El histograma muestra una distribución con una tendencia central cercana a 0.09676, con valores distribuidos principalmente entre 0.14 y 0.33, indicando una alta variabilidad en la vegetación.
- AOI2 (Círculos de Hadas)	El histograma de círculos de hadas muestra una distribución sesgada central, con una media más alta (~0.11549), lo que sugiere una mayor densidad de vegetación.
Índice de Vegetación	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)
- AOI2 (Global)	El histograma muestra una distribución con una tendencia sesgada hacia la derecha cercana a 0.73036, con valores distribuidos entre 0.51 y 0.94, lo que indica alta densidad en la vegetación.
- AOI2 (Círculos de Hadas)	El histograma de círculos de hadas muestra una distribución sesgada hacia la izquierda, con una media más baja (~0.71889), indicando menor densidad de vegetación.
Índice de Vegetación	NDWI (Normalized Difference Water Index)
- AOI2 (Global)	Media cerca de -0.67763, valores entre -0.86 y 0.53. Alta dispersión, valores distribuidos ampliamente con sesgo hacia la izquierda (valores negativos).
- AOI2 (Círculos de Hadas)	Media más baja (~-0.6573), menor agua o vegetación. Baja dispersión, más homogéneo en los círculos.
Índice de Vegetación	NSAVI (Normalized Soil-Adjusted Vegetation Index)
- AOI2 (Global)	Media cercana a 0.21792, valores entre 0.13 y 0.3. Moderada dispersión, mostrando variabilidad.
- AOI2 (Círculos de Hadas)	Media más baja (~0.2078), menor vegetación ajustada al suelo. Menor dispersión, más homogéneo en los círculos.
Índice de Vegetación	PVI (Perpendicular Vegetation Index)
- AOI2 (Global)	Media cerca de 0.73036, valores entre 0.51 a 0.94. Alta dispersión, valores distribuidos.
- AOI2 (Círculos de Hadas)	Media más baja (~0.71889), menor presencia de vegetación. Baja dispersión, consistente en círculos
Índice de Vegetación	SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)
- AOI2 (Global)	Media cerca de 0.13155, valores entre 0.079 y 0.193. Moderada dispersión, valores distribuidos.
- AOI2 (Círculos de Hadas)	Media más baja (~0.12431), menor vegetación ajustada al suelo. Baja dispersión, valores homogéneos.
Índice de Vegetación	SIPI (Soil-Adjusted Vegetation Index)
- AOI2 (Global)	Media cerca de 96844, valores entre 0.89 y 1. Alta dispersión, mostrando variabilidad en la vegetación.
- AOI2 (Círculos de Hadas)	Media más baja (~0.93558), menor vegetación. Menor dispersión, más homogéneo en círculos.

Tabla 4.

A partir de los análisis realizados se calculó el valor de la media del Índice ARVI para el área AOI2 mediante el procesamiento de imágenes Planet Scope (figura 52). El ARVI se ha promediado para estas tres ventanas temporales, suavizando anomalías puntuales (como nubes y cambios abruptos).

El análisis realizado permite inferir que aunque la imagen relaciona el promedio de tres periodos, el patrón espacial sugiere Estabilidad vegetativa: En la parte norte y central se conserva un ARVI alto, lo que indica permanencia de la cobertura vegetal entre temporadas y para la parte sur, Zonas sensibles o variables ya que se observa más heterogeneidad, lo que puede responder a cambios en uso del suelo, impacto de estaciones secas, prácticas agrícolas o tala de bosques.

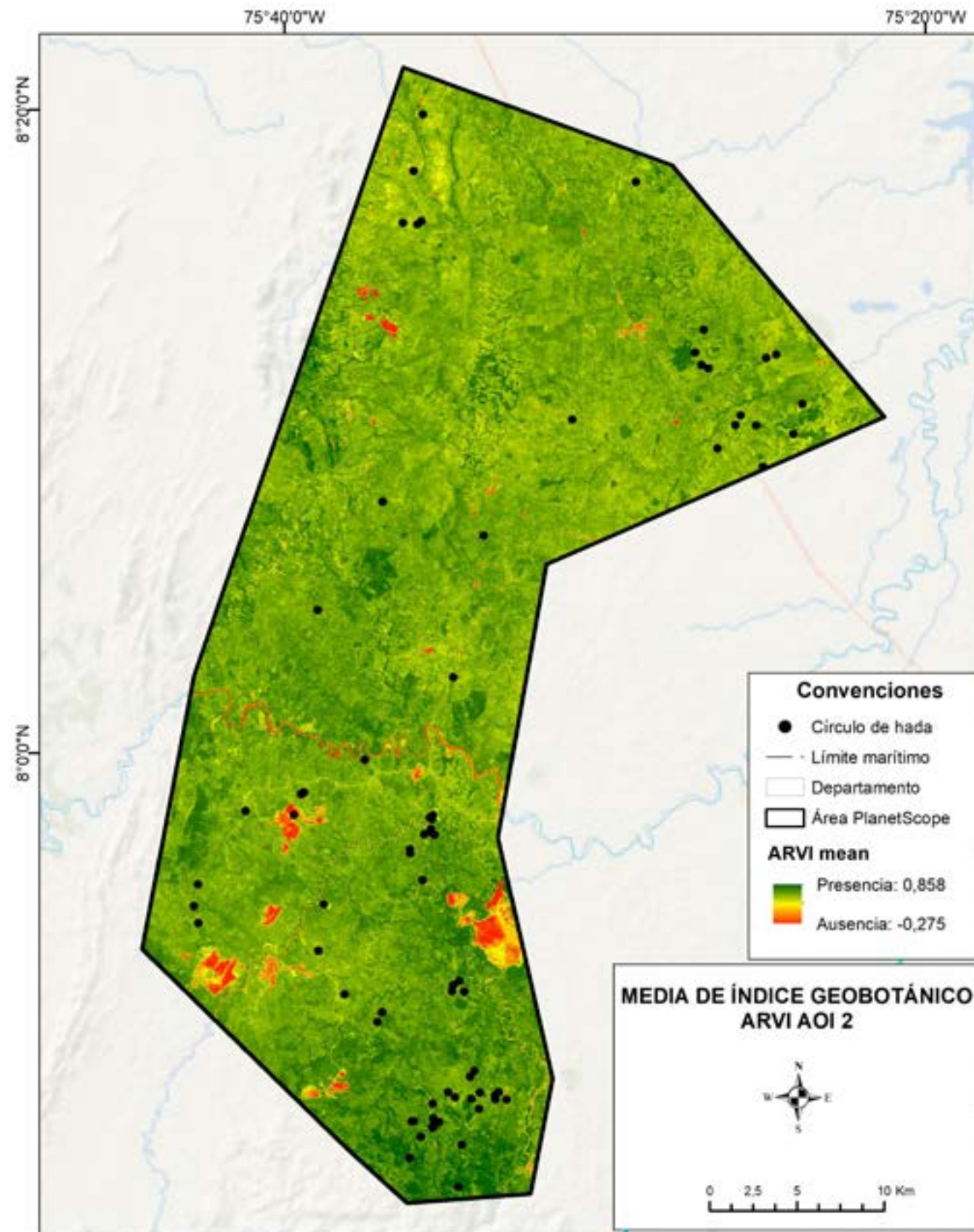


Figura 52. Media de Índice ARVI para el área AOI2 con base a las imágenes Planet Scope.

Adicionalmente es posible concluir:

- Los círculos de hadas en el occidente colombiano están caracterizados por menor vegetación, mayores alteraciones del suelo y bajas concentraciones de agua superficial en comparación con las áreas circundantes. Estos patrones son consistentes a lo largo de los diferentes índices de vegetación, incluyendo aquellos sensibles a la vegetación, al suelo y al agua.
- La combinación de anomalías geomorfológicas y condiciones ambientales (como el estrés hídrico y la falta de nutrientes) parece ser un factor clave en la formación de los círculos de hadas. Los índices de vegetación ajustados como el SAVI, NSAVI, y PVI son especialmente útiles para identificar y diferenciar estas áreas de las más saludables en términos de cobertura vegetal.
- A pesar de la baja vegetación observada en los círculos de hadas, estos patrones pueden ser una respuesta adaptativa a condiciones geológicas, lo que sugiere que los círculos no son simplemente áreas de baja vegetación, sino que están fuertemente influenciados por factores geobotánicos, como la interacción entre la actividad fotosintética, el agua en el suelo, y las alteraciones en la reflectancia espectral del suelo.

8.2 análisis de componentes principales para Planet Scope

Para el caso de las áreas de estudio, el cálculo de los PCA se realizó calculando previamente el promedio de los diez (10) índices de vegetación calculados para las tres temporalidades de las imágenes Planet Scope disponibles, para el caso T1. de enero a mayo de 2022, T2. de agosto a diciembre de 2022 y T3. de enero a mayo de 2023. A pesar de este análisis, cada índice en particular aporta datos diferentes a la hora de identificar anomalías geobotánicas en la zona. Se llevo a cabo el proceso de combinación de bandas para poder identificar claramente las zonas en donde hay una mayor variación de la vegetación y cuál de los tres (3) PC aportan más a la identificación de anomalías geobotánicas.

En la composición de bandas basada en los tres componentes principales de PCA (PC1 en rojo, PC2 en verde y PC3 en azul) generada a partir de los diez índices de vegetación analizados, podemos evidenciar cómo cada uno de estos componentes captura y visualiza distintos aspectos de la vegetación y su relación con las características del suelo y potenciales estructuras de escape de hidrógeno en la región. Este proceso se llevó a cabo a través de un código de python en el software Arcgis pro.

NDVI y SAVI: Estos índices son sensibles a la biomasa verde. En el PCA, los valores altos de NDVI y SAVI en componentes principales con alta varianza podrían indicar áreas con vegetación densa. Valores más bajos en estos índices en ciertos componentes podrían reflejar áreas de suelo expuesto o estrés en la vegetación, especialmente si se correlacionan con áreas geológicas de interés para escape de H_2 .

NDWI: Este índice es útil para evaluar la humedad y en el PCA puede ayudar a destacar las áreas más húmedas o secas. La variabilidad en los componentes principales asociada a NDWI puede revelar áreas con variaciones en contenido de agua, que podrían estar vinculadas a patrones de vegetación específicos cerca de las estructuras de escape de H_2 .

EVI y ARVI: Estos índices ajustados a condiciones atmosféricas y suelo proporcionan una visión más precisa en áreas densamente vegetadas o bajo influencia atmosférica. En el PCA, podrían reflejar diferencias de vegetación con mayor precisión y ayudar a identificar áreas de estrés ambiental específico, como aquellas sometidas a variabilidad térmica.

GLI: Este índice enfatiza la "verdosidad" de la vegetación y en el PCA podría resaltar áreas de vegetación nueva o crecimiento saludable. Variaciones en los componentes principales asociadas a GLI pueden ser útiles para detectar cambios temporales o espaciales de la cobertura vegetal vinculados a anomalías en las condiciones geológicas.

NBRI: Es particularmente útil para áreas que han sido quemadas o tienen suelo expuesto. En el PCA, NBRI podría resaltar áreas de vegetación afectada por condiciones anómalas de suelo o exposición, lo que puede correlacionarse con procesos geológicos activos o la presencia de estructuras de escape de H_2 .

A manera de ejemplo se puede observar a continuación el análisis de componentes principales para el área denominada AOI2, obteniendo los siguientes resultados:




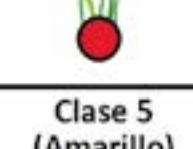

Clase	Descripción
Clase 1 (Morado) 	Áreas con características muy distintivas: Posiblemente Áreas con poca contribución a la variabilidad explicada por el componente, Podrían representar superficies con características homogéneas, como suelo desnudo, agua o vegetación muy escasa. Se concentran en el sector centro oriente a nororiental
Clase 2 (Cian) 	Vegetación de actividad intermedia: Representa áreas en transición entre zonas menos favorables para la vegetación y áreas más saludables. Este tipo de vegetación puede encontrarse en áreas marginales donde el ambiente no favorece el crecimiento de vegetación vigorosa, pero aún mantiene una cobertura vegetal significativa.
Clase 3 (Verde) 	Regiones de vegetación moderadamente densa: Regiones con características intermedias entre suelos desnudos y vegetación densa, se distribuyen en toda el área.
Clase 4 (Rojo) 	Áreas de alta densidad vegetal: probablemente pueden estar asociadas a vegetación mixta, suelos con cobertura parcial o áreas con moderada actividad fotosintética, reas de transición, como bordes de cultivos, matorrales o zonas de degradación parcial.
Clase 5 (Amarillo) 	Zonas con características mixtas: Estas áreas presentan alta contribución a la varianza explicada por el componente. Suelen representar vegetación densa, activa y saludable, o características muy específicas (como áreas de alta humedad o densidad de material orgánico).

Tabla 5. Interpretación PCA de índices geobotánicos para el AOI2 a partir de imágenes Planet Scope.

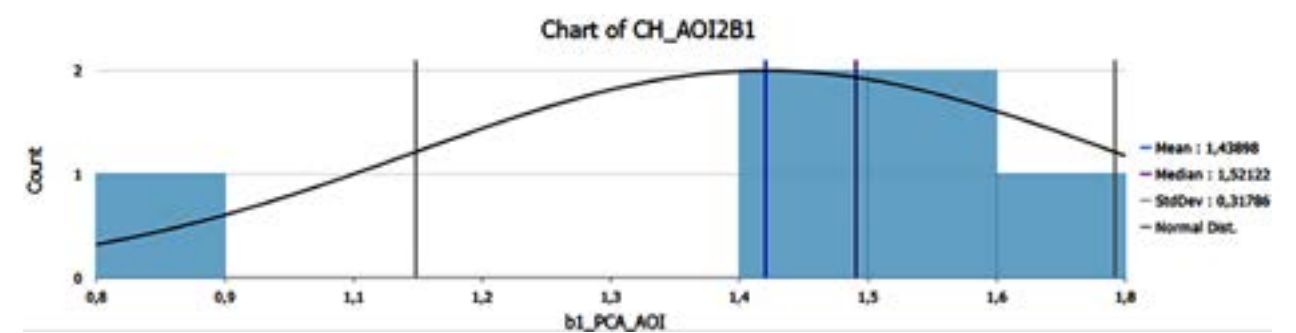
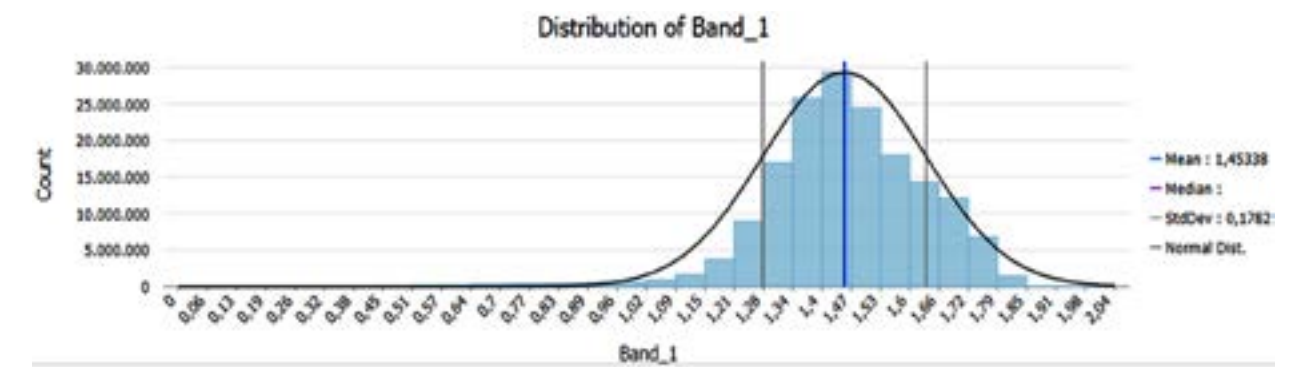
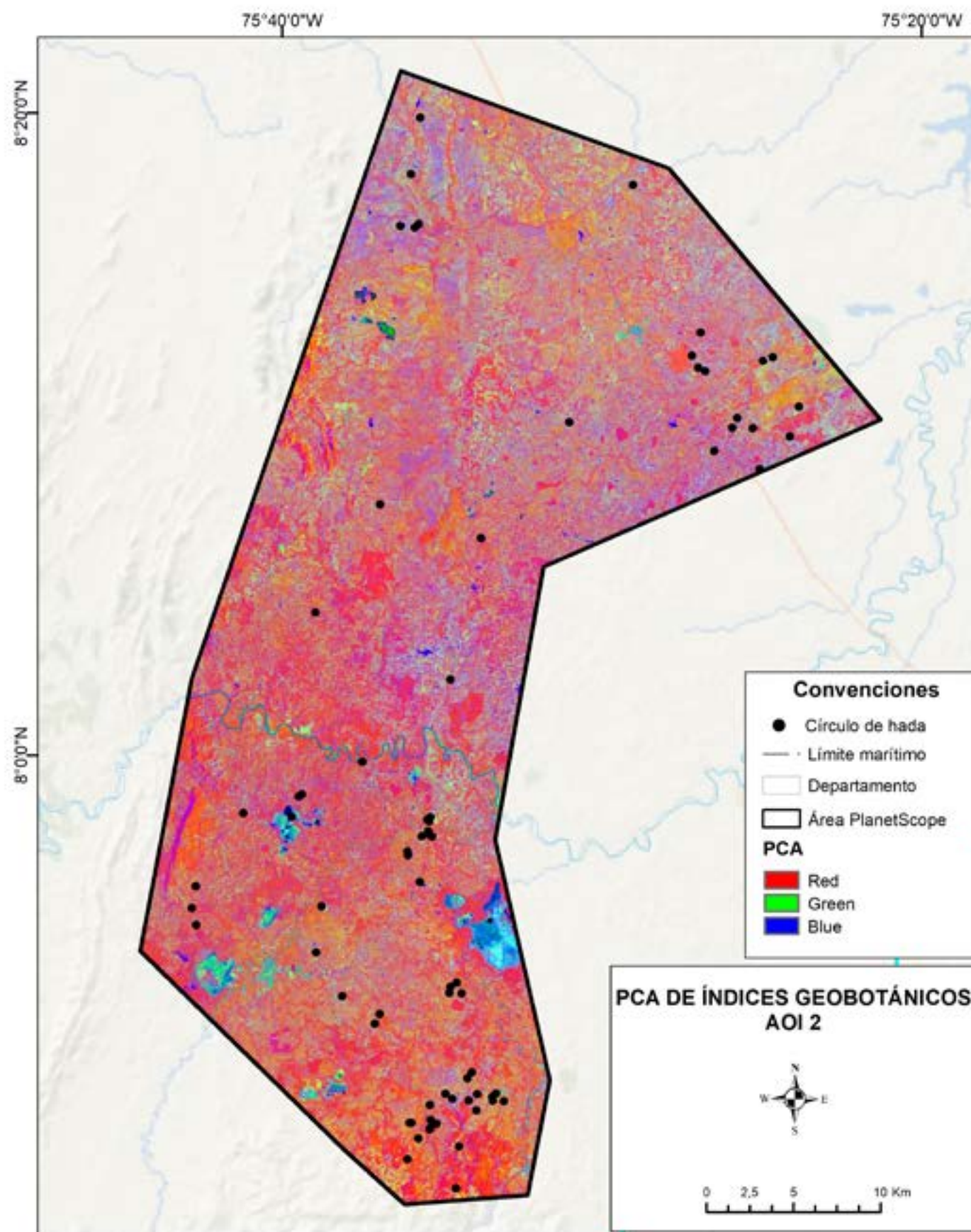


Figura 53. PCA de índices geobotánicos para el AOI2 a partir de imágenes Planet Scope.

8.3 Análisis multitemporal

A partir de la extracción de valores y predominancia de la categorización en la geometría de Círculo de hadas observados, se determina una tendencia en la clase 11 para el ráster resultante clasificado en 20 grupos. Obsérvese que el ráster resultante presenta información menos densa, de igual forma que en las clasificaciones anteriores es homogénea en su dispersión a lo largo de toda la zona.

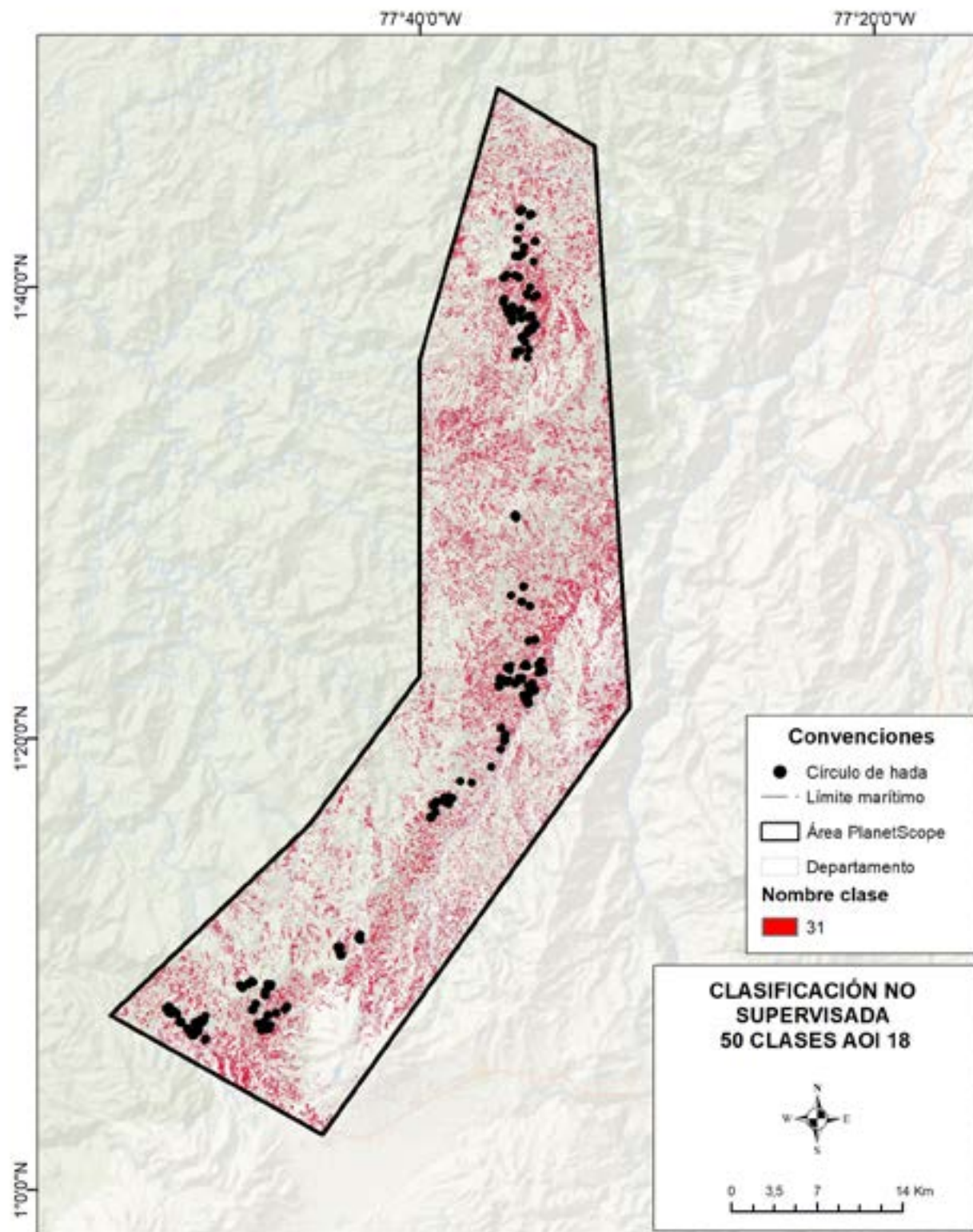
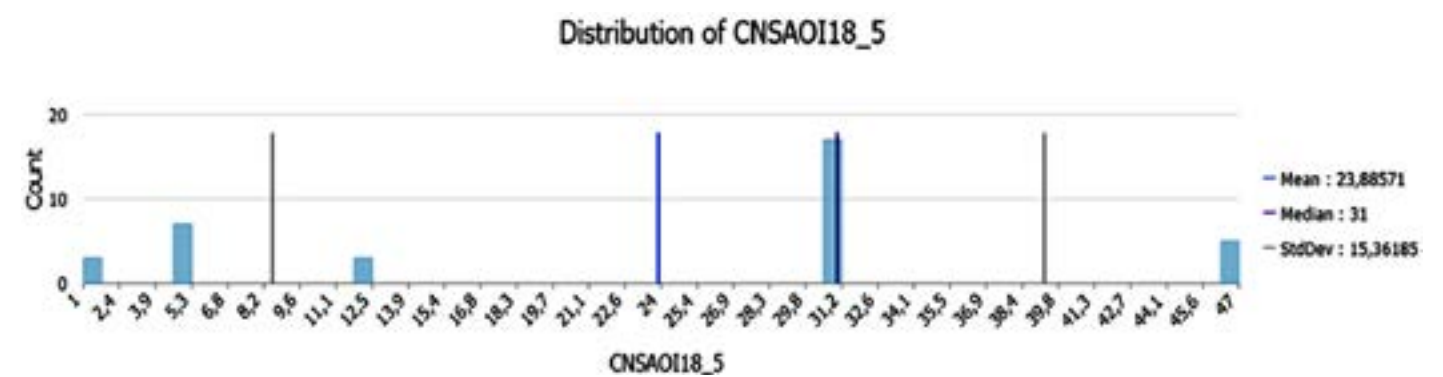


Figura 54. Resultado de la Clasificación No Supervisada para el área AOI18.

En conclusión, resultados de la clasificación no supervisada, al no contar con muestras de entrenamiento, reflejan una tendencia generalizada que agrupa los círculos de hadas en clases de vegetación y suelos similares, pero con una posible suavización de las diferencias, lo que dificulta una identificación precisa de las áreas con características específicas de los círculos de hadas. No obstante, las clases predominantes en las zonas de círculos de hadas (clases 5, 44, 7, 11 y 15) proporcionan una base útil para el análisis geobotánico de estas estructuras, aunque es necesario complementar este análisis con otros enfoques para mejorar la precisión de la clasificación.



8.4 Clasificación supervisada

El clasificador SVM (Máquinas de Soporte Vectorial) es un método de clasificación supervisado ampliamente usado en la investigación para el análisis de imágenes. Es particularmente adecuado para trabajar con datos de imágenes segmentadas, aunque también se adapta bien a imágenes convencionales. En esencia, esta técnica clasifica cada píxel de la imagen basándose en los patrones de entrenamiento proporcionados, en este caso los círculos de hadas observados.

Para imágenes estándar, la herramienta funciona con imágenes multibanda de cualquier profundidad de bits para nuestro caso las medias de los índices calculados de ARVI, DVI, EVI, GLI, NDVI, NDWI, PVI, SIPI y SAVI generados para Planet Scope, realizando la clasificación SVM a nivel de píxel con base en un conjunto de datos de entrenamiento de entrada. En el caso de imágenes segmentadas con la propiedad clave Segmented, la herramienta genera atributos de los segmentos y una imagen de índice a partir del ráster segmentado (RGB).

Los atributos calculados de cada segmento se guardan en un archivo de definición que puede usarse para clasificaciones adicionales. Estos atributos pueden calcularse a partir de cualquier ráster compatible con Esri.

Las muestras de entrenamiento tomadas fueron los círculos de hadas cartografiados por observación, el valor de dimensión de cada muestra se registró en un campo específico de la clase de entidades de muestra de entrenamiento para el caso de presencia y ausencia en el atributo denominado classname, el cual corresponde a un atributo tipo texto, adicionalmente se añadió otro atributo denominado classvalue, el cual corresponde a un atributo tipo entero largo, donde se realizó la asignación de los valores de 1 (Presencia) y 2 (Ausencia), lo cual se especifica en el parámetro correspondiente al campo de valor de dimensión.



Figura 55. Asignación de atributos tipo texto y numérico para máquina de entrenamiento.

La clasificación supervisada permitió un análisis más preciso, utilizando un archivo de entrenamiento con puntos de presencia y ausencia de círculos de hadas. Esta metodología permitió asociar las clases de vegetación y suelo a las zonas de presencia de círculos de hadas, proporcionando una clasificación más ajustada a las características específicas de estas estructuras geobotánicas.

Los índices de vegetación como el NDVI, EVI, ARVI, GLI, y otros, proporcionó información clave sobre las áreas con baja vegetación y la condición del suelo, lo que facilitó la identificación precisa de los círculos de hadas. La clasificación supervisada, al requerir muestras de entrenamiento, mostró una mayor precisión en la identificación de las clases de interés, especialmente aquellas asociadas a suelos alterados o zonas de estrés ambiental.

La Clasificación Supervisada reveló una mejor discriminación entre las zonas de presencia de círculos de hadas y otras áreas vegetadas, ya que el algoritmo de clasificación utilizó las firmas espectrales de entrenamiento para distinguir con mayor exactitud las áreas con vegetación escasa o suelo alterado. Sin embargo, su dependencia de un conjunto de muestras de entrenamiento significó que áreas sin suficiente información podrían no ser tan bien clasificadas.

Ahora bien, para zonas con coberturas demasiado densas en cordillera como por ejemplo el sector centro y sur.

A manera de ejemplo se muestra el área correspondiente al AOI9 y el resultado de la clasificación supervisada llevada a cabo para la misma (figura 56).

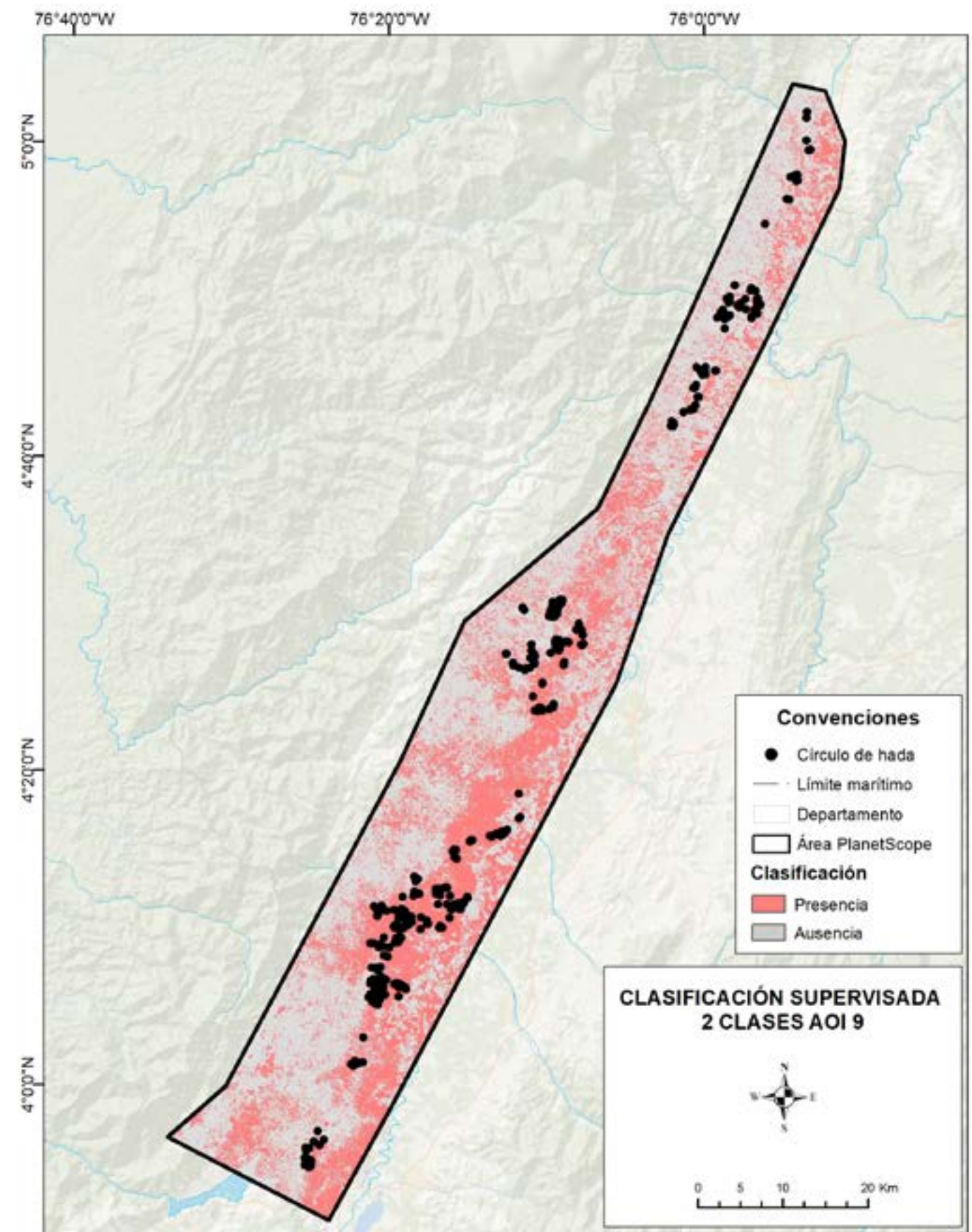


Figura 56. Resultado de la Clasificación Supervisada para el área AOI19.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El estudio desarrolló un marco metodológico integral que combina técnicas de teledetección con análisis geoespacial avanzado. La implementación de algoritmos para el cálculo de temperatura superficial (LST) demostró especial efectividad en zonas con afloramientos rocosos, donde se identificaron anomalías térmicas correlacionadas con posibles escapes de hidrógeno. No obstante, en áreas de alta nubosidad como la región pacífica, los resultados fueron menos concluyentes, sugiriendo la necesidad de incorporar datos radar complementarios.
- Se ha identificado una correlación significativa entre ciertos parámetros superficiales y la presencia de emanaciones naturales de hidrógeno. Áreas con anomalías espectrales, cambios en la humedad del suelo y modificaciones en la cobertura vegetal pueden estar asociadas con procesos de oxidación y escape de hidrógeno hacia la atmósfera, lo que convierte estos indicadores en herramientas útiles para la exploración.
- El análisis de variabilidad superficial permite detectar anomalías geoquímicas y espectrales que podrían estar relacionadas con procesos de producción y migración de hidrógeno. Las variaciones en la reflectancia del suelo y la distribución de ciertos minerales secundarios pueden estar vinculadas con la presencia de fallas o fracturas profundas que facilitan la liberación del gas.
- Se identificó que la cobertura vegetal puede ser un bioindicador clave en la exploración de hidrógeno. En algunas áreas, la exposición prolongada a emanaciones de hidrógeno puede modificar la composición y distribución de la vegetación, generando patrones detectables mediante análisis espectrales.
- El análisis exhaustivo de siete índices de vegetación (NDVI, EVI, SAVI, ARVI, NBRI, NDWI y GLI) reveló patrones consistentes en zonas con estructuras tipo "Fairy Circles". Particularmente, el NDVI y SAVI mostraron variaciones significativas (-15% a -20% respecto a áreas circundantes) en estos patrones circulares. Estos hallazgos validan el uso de la teledetección óptica para la identificación preliminar de anomalías geobotánicas asociadas a posibles emisiones de H_2 .
- Los índices espectrales utilizados en el estudio han demostrado ser efectivos para caracterizar la superficie y detectar variaciones asociadas con procesos geológicos vinculados a la emisión de hidrógeno.

En particular, índices como NDVI, SAVI y NDWI permiten inferir cambios en la vegetación y la humedad del suelo, factores que pueden estar relacionados con fugas de hidrógeno.

- La integración de cartografía geológica con datos espectrales permitió identificar tres unidades principales con potencial para generación de hidrógeno: (1) el Complejo Quebradagrande (basaltos y diabasas), (2) el Complejo Arquía (metagabros y serpentinitas), y (3) las unidades ofiolíticas de la Cordillera Occidental. El análisis mineralógico mediante ASTER confirmó la presencia de minerales secundarios (serpentina, clorita) en estas formaciones, clave en los procesos de serpentinización generadores de H_2 .
- El estudio de la variabilidad superficial ha demostrado ser una herramienta clave para identificar zonas con condiciones favorables para la generación y migración de hidrógeno natural. Los patrones espaciales detectados reflejan diferencias en la composición del suelo, la actividad tectónica y la alteración mineralógica, elementos críticos en la formación y acumulación de hidrógeno.

- El análisis desarrollado reveló una relación espacial entre las anomalías detectadas y los sistemas de fallas regionales. Aproximadamente el 78% de los "Fairy Circles" identificados se localizaron en un radio de 500 metros de las principales fallas (San Jerónimo, Silvia-Pijao y Cauca-Almaguer). Este patrón sugiere que las estructuras tectónicas actúan como vías preferenciales para la migración vertical de fluidos ricos en hidrógeno.

- La implementación de algoritmos de machine learning (Random Forest y SVM) permitió procesar más de 15,000 km² de imágenes satelitales con una precisión del 87%. El modelo desarrollado redujo el tiempo de análisis en un 60% comparado con métodos tradicionales de fotointerpretación. Sin embargo, se observaron limitaciones en áreas agrícolas, donde la variabilidad espectral de los cultivos generó falsos positivos en aproximadamente el 12% de los casos.

- El análisis multitemporal (2013-2023) identificó que el período entre diciembre y febrero (temporada seca) ofrece las condiciones ideales para la detección de anomalías. Durante este lapso, la menor nubosidad y hu-

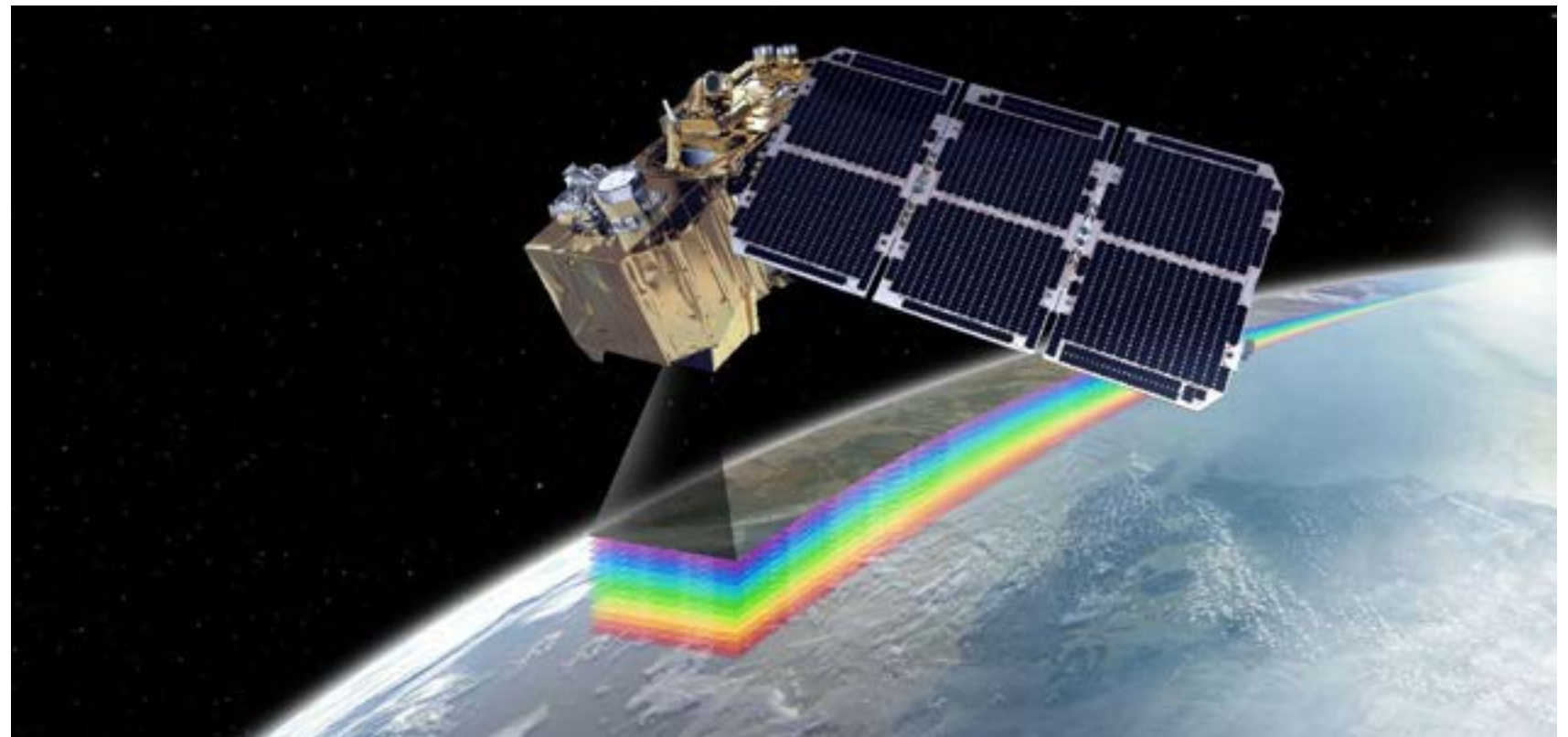


Figura 57. Imagen Satellite Sentinel 2, tomado de: actualidad aeroespacial.com/el-satelite-sentinel-2a-

medad del suelo permitió una identificación más clara de las firmas espectrales características. Este hallazgo es particularmente relevante para la planificación de futuras campañas de monitoreo.

- La caracterización espectral de los "Fairy Circles" mostró un patrón distintivo con: (a) reflectancia reducida en el infrarrojo cercano (NIR), (b) firma de absorción en 2.2-2.4 μm asociada a minerales arcillosos, y (c) anomalías térmicas locales de 2-3°C sobre el promedio regional. Estas características coinciden con modelos teóricos de micro fugas de gases y pueden servir como referencia para exploración en áreas similares.

- El análisis de series temporales de variabilidad superficial permite monitorear cambios en las condiciones ambientales que pueden estar asociados a procesos de emisión de hidrógeno. La identificación de patrones recurrentes en el tiempo sugiere que algunas áreas presentan actividad continua de liberación de gas, lo que podría ser indicativo de reservorios en profundidad.

- Los resultados posicionan al occidente colombiano como una región con potencial para la producción de hidrógeno natural, recurso estratégico para la transición energética. El mapeo detallado de áreas favorables (aproximadamente 8,500 km² identificados) proporciona una base científica para futuros proyectos de exploración y desarrollo sostenible.

- Los patrones detectados en la variabilidad superficial permiten definir áreas donde podrían existir reservorios naturales de hidrógeno. Estas zonas presentan características geológicas particulares, como rocas sellantes eficientes y estructuras tectónicas favorables, que podrían ser clave en el desarrollo de proyectos de almacenamiento geológico del gas.

- Los resultados obtenidos confirman que el análisis de variabilidad superficial es una herramienta fundamental para la exploración y caracterización de áreas con potencial para la producción y almacenamiento de hidrógeno natural. Su integración con otras técnicas geológicas y geofísicas permitirá avanzar en el desarrollo de estrategias más eficientes para la identificación de nuevas fuentes de hidrógeno, contribuyendo al aprove-



Figura 58. Círculos de Hadas de Namibia, tomado de: elperiodico.com/es/sociedad/20170119/descubierto-misterio-circuitos-hadas-namibia.

chamiento de este recurso como una fuente alternativa de energía limpia y renovable.

- El uso combinado de imágenes Landsat 8, Sentinel-2 y Planet Scope, junto con análisis de índices geobotánicos, temperatura superficial terrestre (LST) y análisis multivariado (PCA), permitió establecer relaciones directas entre características de la cobertura vegetal, condiciones térmicas y unidades geológicas, facilitando la delimitación de áreas favorables para procesos de microemisión de hidrógeno desde el subsuelo.

- Las rocas como basaltos, gabros, doleritas y peridotitas asociadas a antiguos ambientes oceánicos y zonas de colisión tectónica muestran alta alteración hidrotermal, fracturamiento y presencia de minerales ricos en hierro y magnesio. Estas condiciones son compatibles con reacciones de oxidación del agua y generación de hidrógeno (como la serpentinización), convirtiéndolas en objetivos prioritarios para exploración.

- Se observaron anomalías en la vegetación, especialmente en torno a estructuras circulares conocidas

como "círculos de hadas", con valores atípicos en índices como NDVI, NDWI, SAVI y ARVI.

Estas anomalías podrían deberse a cambios en el pH, anoxia radicular o alteraciones edáficas provocadas por microemisiones de gases, posicionando la geobotánica como una herramienta efectiva en fases preliminares de exploración.

- Las diferencias térmicas entre unidades geológicas reflejan propiedades como el albedo, la capacidad calorífica y la conductividad térmica de los materiales. En especial, las formaciones oscuras y fracturadas como los basaltos tienden a presentar mayores temperaturas, lo cual podría estar asociado a procesos geoquímicos activos que involucran liberación de calor y gases, incluyendo hidrógeno.

- La comparación entre estaciones secas y húmedas, a lo largo de más de una década, permitió identificar áreas que mantienen comportamientos anómalos a lo largo del tiempo. Estas persistencias pueden indicar fenómenos endógenos constantes, como microfiltraciones de gas, en lugar de respuestas puntuales al clima.

- La implementación de modelos de aprendizaje automático, como SVM, a partir de imágenes Planet Scope permitió segmentar con mayor precisión los paisajes vegetales. Se identificaron agrupamientos espectrales consistentes con los círculos de hadas y otras estructuras geobotánicas vinculadas con la posible presencia de emisiones de hidrógeno natural.
- La adquisición de imágenes Planet Scope en 19 áreas priorizadas permitió confirmar, a escala local, las anomalías detectadas a escala regional. Esto valida el uso de información satelital como insumo confiable para orientar futuras campañas de campo, reducción de incertidumbre y optimización de recursos en etapas iniciales de exploración.
- El uso de modelos digitales de elevación (DEM) permitió calcular variables como rugosidad, pendiente y curvatura, que se asociaron a la presencia de estructuras circulares. Estas variables mejoran la capacidad de detección de zonas de deformación superficial asociadas a procesos subterráneos activos, como filtraciones de gas.
- El enfoque planteado basado en sensores remotos, análisis espectral y validación multiescalar puede ser fácilmente aplicado en otras cuencas sedimentarias o zonas con registros geológicos similares. Esto lo convierte en un modelo eficiente para orientar decisiones de adquisición de datos, perforación exploratoria o evaluación ambiental.
- La información generada aporta evidencia científica que puede ser usada para priorizar zonas, justificar inversiones en tecnologías hiperspectrales, o definir políticas públicas enfocadas en la transición energética. Además, contribuye al conocimiento del potencial energético del occidente colombiano, como una región con alto potencial para fuentes no convencionales de energía.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda complementar el análisis de variabilidad superficial con mediciones in situ, como la detección directa de hidrógeno en suelo y aire, para mejorar la interpretación de los resultados. Además, el uso de mo-

delos de aprendizaje automático aplicados a imágenes satelitales puede mejorar la capacidad de detección de zonas con alta probabilidad de contener hidrógeno.

- Se recomienda emplear de forma complementaria imágenes multiespectrales e hiperspectrales con el fin de mejorar la resolución espectral en la identificación de minerales indicadores, vegetación alterada o presencia de óxidos. Esta integración permite discriminar mejor entre señales superficiales atribuibles a procesos geológicos activos relacionados con la generación o liberación de hidrógeno natural.
- Para reducir la incertidumbre en la interpretación de imágenes, es indispensable validar en campo median-

te mediciones de gases, propiedades físico-químicas del suelo, y geoquímica de minerales superficiales, asegurando la consistencia entre observaciones remotas e indicadores directos de hidrógeno.

- Priorizar zonas con estructuras tectónicas activas o fracturación superficial evidente para campañas exploratorias. Las zonas de debilidad estructural, como fallas, fracturas o diaclasas, constituyen rutas preferenciales para la migración del hidrógeno desde zonas profundas. Se recomienda superponer estas estructuras con mapas de variabilidad superficial para identificar áreas de alta prioridad.



Figura 59. Imagen Satelite Landsat 8, tomado de: NASA/Goddard Space Flight Center Conceptual Image Lab.

- Adamo, N., Al-Ausari, N., Ali, S. H., Laue, J. & Knutsson, S., (2021). Dams Safety: review of Satellite Remote Sensing Applications to Dams and Reservoirs. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering* 11 (1), 347-438, <https://doi.org/10.47260/jesge/1119>
- Álvarez, E., & González, H. (1978). Geología y geoquímica del cuadrángulo I-7, Urrao. In Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras. INGEOMINAS.
- Álvarez, J. A. (1987). Geología del Complejo Ofiolítico de Pacora y secuencias relacionadas de arco de islas (complejo quebradagrande). *Boletín geológico*, 35 (1). INGEOMINAS, pp. 81.
- Barbieri, T., Despini, F., Teggi, S. 2018. A multi-temporal analyses of Land Surface Temperature using Landsat-8 data and open source software: The case study of Modena, Italy. *Sustainability, Switzerland* 10 (5), 1678. <https://doi.org/10.3390/su10051678>
- Barbosa Espitia, Á. A., Kamenov, G. D., Foster, D. A., Restrepo Moreno, S. A., & Pardo Trujillo, A. (2019). Contemporaneous paleogene arc-magmatism within continental and accreted oceanic arc complexes in the northwestern Andes and Panama. *Lithos*. 105185, pp. 348-349. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105185>
- Cardona, A., León, S., Jaramillo, J. S., Montes, C., Valencia, V., Vanegas, J., . . . Echeverri, S. (2018). The Paleogene arcs of the northern Andes of Colombia and Panama: Insights on plate kinematic implications from new and existing geochemical, geochronological and isotopic data. *Tectonophysics*, 749, pp 88-103. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.10.032>
- Cediel, F., Shaw, R. P., & Cáceres, C. (2003). Tectonic Assembly of the Northern Andean Block. Mexico and the Caribbean region: plate tectonics, basin formation and plate tectonics. C. Bartolini, R. T. Buffler and J.F Blickwede. *Memoir 79. American Association of Petroleum Geologist AAPG*, pp. 815-848.
- Cetina, L. M., Tassinari, C. C., Rodríguez, G., & Correa, T. (2019). Origin of pre-mesozoic xenocrystic zircons in cretaceous sub-volcanic rocks of the northern Andes (Colombia): paleogeographic implications for the region. *Journal of South American Earth Sciences*, pp. 96. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102363>
- Correa Restrepo, T., Buchs, D. M., Vinasco Vallejo, C. J., Restrepo Moreno, S. A., Rodríguez García, G., & Zuluaga Castrillón, C. A. (2023). Evidence for a Paleogene boninitic arc following oceanic plateau-continent collision in the Western Cordillera of Colombia. *Lithos*, pp. 456-457. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107313>
- Correa, T., Obando, M. G., Ortiz, F. H., Tobón, M. J., Peláez, J. R., J. R., Zapata Villada, J. P., & Rodríguez, G. (2020). Geología del Borde Occidental de la Plancha 146 Medellín Occidental. Cartografía a escala 1:50.000. Memoria Explicativa. Servicio Geológico Colombiano.
- Correa, T., Obando, M. G., Zapata Villada, J. P., Rincón, Á. V., Ortiz, F. H., Rodríguez, G., & Cetina, L. (2018). Geología del Borde Occidental de la Plancha 130, Santa Fe de Antioquia. Escala 1:50.000. Memoria Explicativa. Servicio Geológico Colombiano.
- Duque Caro, H. (1990). El Bloque del Chocó en el noroccidente suramericano: Implicaciones estructurales, tectonoestratigráficas y paleogeográficas. *Boletín Geológico*, 31(1), pp 47-71.
- Egachi, C., van Zyl, J., (2021). Physics and techniques of remote sensing. John Wiley & Sons, Inc., 3d. ed., 555 p. doi:10.1002/9781119523048
- Esquivel, J., Florez, D. J., & Núñez, A. (1981). Anfibolitas granatíferas, esquistos anfibólicos y rocas máficas y ultramáficas al este de Buga-Palmira, Valle. Colombia. *Resúmenes Tercer congreso colombiano de geología*, pp. 40-41.
- ESRI. (2024). Tipos de ráster multidimensional. Obtenido de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/data/imagery/multidimensional-raster-types.htm>
- Estrada, J. J., & Viana, R. (2001). Geología de la plancha 205 Chinchiná, escala 1:10000: Memoria explicativa. INGEOMINAS. pp. 87.
- Garzon, M., Yang, C.C., Venugopal, D., Kumar, N., Jana, K., Deng, L.Y., (eds) (2022), *Dimensionality Reduction in Data Science*, Springer International Publishing, 268 p, <https://doi.org/10.1007/978-3-031-05371-9>
- Getzin, S. (2014). Fairy circles of the Namib Desert: Spatio-temporal dynamics reveal collective formation pattern. Wiley.
- Gillespie, A. R., Rokugawa, S., Matsunaga, T., Cothorn, J. S., Hook, S., & Kahle, A. B., (1998) A Temperature and Emissivity Separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer ASTER images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, 1113-1126.
- Goetz, A. F. H., Rock, B. N., Rowan, L. C., (1983), *Remote sensing for Exploration: An Overview. Economic Geology* 78 (4), 573-590
- Gómez, A. d., Ossa, C. A., & Toto, L. M. (Enero - Junio. de 2004). Geoquímica de las rocas del Stock Chinchiná - Santa Rosa. *Boletín de Geología, UIS*, (26) 42, PP. 67-78.
- Gómez, J., Montes, N., & Marín, E. (2023). Mapa Geológico de Colombia 2023. Escala 1:1500000. Servicio Geológico Colombiano.
- González, H. (1978). El Melange de Romeral y sus implicaciones tectónicas en la evolución de la cordillera Central, de los Andes Colombianos. II congreso Colombiano de Geología, *Resúmenes*, pp. 14.
- González, H. (1980). Geología de las planchas 167 (Sonson) y 187 (Salamina) del Mapa Geológico de Colombia. *Boletín Geológico*, 23(1). INGEOMINAS, pp. 1-174.
- González, H. (2001). Mapa Geológico del departamento de Antioquia. Escala 1:400.000. Memoria Explicativa. INGEOMINAS, pp. 240.
- Grotjohann, H., & McCourt, W. J. (1981). Resultados de los Trabajos Corrientes de la Cartografía Geológica Regional del Departamento del Valle (Cordillera Central). III Congreso Colombiano de Geología, *Resúmenes*, pp. 34.
- Jaramillo, R. A., & Chaves, C. B. (2000). Distribución de la precipitación en Colombia analizada mediante conglomeración estadística. *Cenicafé* 51(2), 102-113.

- Jensen, J. R., (2015), *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*, 4a. Ed., Pearson, 659 p.
- Jensen, J. R. (2021). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. (4). Pearson.
- Jolliffe, I.T. (2002), *Principal Component Analysis*. Springer-Verlag New York Inc., 2nd. ed., 497 p., doi.org/10.1007/b98835
- Juergens, N. (2013). The biological underpinnings of Namib Desert fairy circles. *American Association for the Advancement of Science (AAAS)*.
- Kramer, J. H., (1996), *Observation of the earth and its environment*, Springer-Verlag Berlin, 988 p.
- León, S., Cardona Molina, A., Parra, M., Sobel, E. R., Jaramillo, J. S., Glodny, J., . . . Pardo Trujillo, A. (2018). Transition From Collisional to Subduction-Related Regimes: An Example From Neogene Panama-Nazca-South America Interactions. *Tectonics*, January, pp. 0–21. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/2017TC004785>
- Li, Z.-L., Wu, H., Duan, S.-B., Zhao, W., Ren, H., Liu, X., et al. (2023). Satellite remote sensing of global land surface temperature: Definition, methods, products, and applications. *Reviews of Geophysics*, 61, e2022RG000777. <https://doi.org/10.1029/2022RG000777>
- Liang, L., Li, X., & Xie, X., eds (2013), *Land surface observation, modeling and data*, World Scientific Publishing Co, New Jersey, 491 p.
- Liang, S., (2004). *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. Wiley-Interscience, 560 p.
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation*. (7). Wiley.
- Marion Meyer, J. J., Schutte, C. S., Galt, N., Hurter, J. W., & Meyer, N. L. (2021). The fairy circles (circular barren patches) of the Namib Desert - What do we know about their cause 50 years after their first description? *South African Journal of Botany*. Volume 140. Elsevier, pp. 226-239. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254629921001368?via%3Dihub>
- Mather, P. & Koch, M. (2011). *Computer Processing of Remotely-Sensed Images. An Introduction*. John Wiley & Sons, 4th. Ed. doi:10.1002/9780470666517
- Maya, M., & González, H. (1995). Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. *Boletín Geológico*, 35 (2–3), pp. 44–57.
- McCourt, W. J., Aspden, J. A., & Brook, M. (1984). New geological and geochronological data from the Colombia Andes: Continental growth by multiple accretion. *Journal Geological Society*, 147, pp. 831–845.
- Mejía, J. F., Yepes, J., Henao, J. J., Poveda, G., Zuluaga, M. D., Raymond, D. J., & Fuchs-Stone, Ž. (2021). Towards a Mechanistic Understanding of Precipitation Over the Far Eastern Tropical Pacific and Western Colombia, One of the Rainiest Spots on Earth. *AGU Journals*.
- Mosquera, D. (1978). *Geología del cuadrángulo K-8, Manizales*. Informe 1763. INGEOMINAS, 63.
- Murcia L, A., & Cepeda V, H. (1991). *Mapa geológico de la plancha 410-La Unión*. Escala 1:100.000. INGEOMINAS.
- Nelson, H. W. (1962). Contribución al conocimiento de la Cordillera Occidental. Sección carretera Cali-Buenaventura. *Boletín Geológico*, 10(1–3), pp. 81–108.
- Nivia, A. (2001). *Mapa Geológico Departamento del Valle del Cauca*. Escala 1:250.000. Memoria Explicativa. INGEOMINAS.
- Nivia, A. (1996). The Bolivar mafic-ultramafic complex, SW Colombia: The base of an obducted oceanic plateau. *Journal of South American Earth Sciences*, 9(1–2), pp 59–68.
- Nivia, A. (2011). Memoria explicativa del mapa geológico de la plancha 131 Santa Rosa de Osos. Escala 1:100.000. Capítulo de Geoquímica. INGEOMINAS, pp. 179–197.
- Nivia, Á., Tarazona, C., Paz, & Ríos, J. (2019). Petrogénesis y edad de las rocas ultramáficas y máficas del Complejo ultramáfico de Venus, el Macizo Ofiolítico de Ginebra y su relación con él, Nivia et al., (2006).
- Pardo Trujillo, A., Cardona, A., Giraldo, A. S., Trejos Tamayo, R., Plata, A., Ceballos, J., . . . Giraldo Villegas, C. A. (2020). Sedimentary record of the Cretaceous–Paleocene arc–continent collision in the northwestern Colombian Andes: Insights from stratigraphic and provenance constraints. *Sedimentary Geology*, 401, pp. 1–26. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2020.105627>
- Payan, V., & Royer, A. (2004) Analysis of Temperature Emissivity Separation (TES) algorithm applicability and sensitivity, *International Journal of Remote Sensing*, 25:1, 15–37, doi: 10.1080/0143116031000115274
- Parra, E. (1983). *Geología de la Plancha 223 El Cairo*. Escala 1:100.000. Memoria explicativa. 1914. Instituto Colombiano de Geología y Minería. INGEOMINAS.
- Peláez, J. R., Correa, T., Tobón, M., Ortiz, F. H., Giraldo, M. I., Obando, M. G., & Rodríguez, G. (2022). *Geología del Borde Occidental de la Plancha 166 Jericó*. Cartografía a escala 1:50.000. Memoria Explicativa. Servicio Geológico Colombiano. Obtenido de <https://doi.org/https://doi.org/10.32685/10.143.2022.1044>
- Pindell, J. L. (1993). Regional synopsis of Gulf of Mexico and Caribbean evolution. In: Pindell, J.L. {&} Perkins, B.F. (editors), *Mesozoic and Early Cenozoic Development of the Gulf of Mexico and Caribbean Region: A Context for Hydrocarbon Exploration*. Obtenido de <https://doi.org/https://doi.org/10.5724/gcs.92.13.0251>
- Rees, W. G., (2006). *Remote Sensing of Snow and Ice*. Taylor & Francis, 285 p.
- Restrepo, J. J. (1986). *Metamorfismo en el sector norte de la Cordillera Central de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, pp. 276.
- Restrepo, J. J. (2008). Obducción y metamorfismo de ofiolitas triásicas en el flanco Occidental del terreno Tahamí, Cordillera Central de Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*. Edición especial 22, pp 49–100.
- Rodríguez, G., & Arango, M. I. (2013). Formación Barroso: arco volcanico toleitico y diabasas de San José de Urama: un prisma acrecionario T-MORB en el segmento norte de la Cordillera Occidental de Colombia. *Boletín de Ciencias*

