

INTRODUCCIÓN

El uso de las tecnologías de la información geográfica está cambiando la forma de hacer ciencia, pasando de una forma analógica a una digital, esto sumado a las cada vez más utilizadas técnicas de percepción remota, que permite realizar análisis de sitios difíciles de acceso a través de imágenes de la Tierra, adquiridas por sensores transportados por plataformas aéreas o espaciales.

Stoner y Baumgardner (1981) y Galvão y Vitorello (1998, citado por Córdoba, 2009) establecen que la reflectancia es la relación entre la intensidad de luz reflejada por una cubierta y la intensidad de luz incidente sobre ella, se mide mediante espectrofotómetros de reflexión específicos o de amplio espectro compuestos por una fuente de luz y un prisma que descompone la fuente de luz en longitudes de onda distintas, obteniéndose un espectro continuo de reflectancia de la cubierta. Para Smith (et al, 1990) la radiación detectada puede ser considerada como una mezcla de diferentes respuestas espectrales procedentes de los distintos materiales que la componen. Agregado a ello la interacción de la capa atmosférica que se encuentra entre la posición del sensor y el objeto de su medida contribuye con la respuesta espectral mixta, pudiendo separarse o ser modelada mediante correlación entre los datos registrados por el sensor del satélite y los registrados por el sensor in situ.

Hasta el año 2007, no existían protocolos sobre metodologías específicas para la aplicación de radiometría de campo (Vásquez et al, 2007) de forma exhaustiva, para todo tipo de cubierta (naturales y/o antropogénicas), destacando que en la actualidad se calcula el número y tamaño de muestras para diferentes cubiertas, en su mayoría aplicando modelos estadísticos de correlación.

En el presente trabajo como lo que se pretende es establecer diferencias entre posibles áreas de cráteres y otros suelos, el área de estudio está sujeta a los

patrones identificados previamente como potenciales cráteres. Dichos patrones fueron identificados por filtros utilizados para resaltar alineamientos y bordes así como de alteraciones hidrotermales, manifestado como todo cambio ambiental sobre las rocas, provocando una respuesta mineralógica, química y textural, en presencia de agua caliente, vapor o gas (Corrales R, 2015). Este tipo de procesos ocurre a través de la transformación de fases minerales, crecimiento de nuevos minerales, disolución de minerales y/o precipitación, y reacciones de intercambio iónico entre los minerales constituyentes de una roca y el fluido caliente que circuló por la misma. Aunque la composición litológica inicial tiene una influencia en la mineralogía secundaria (hidrotermal), su efecto es menor que el debido a la permeabilidad, temperatura y composición del fluido (Maksaev V., 2003).

Con técnicas de teledetección, aplicando ACP selectivos o dirigidos se puede cartografiar minerales relacionados con la alteración hidrotermal, tales como óxidos de hierro y minerales arcillosos, con contenidos potásicos, filíticas y propilíticas (Bragado, E., Rejas, J.G., Marchamalo M. & Martínez, R. 2008).

En el mundo de la ciencia, investigadores como Delendatti, describen un ACP como una combinación lineal por la cual un conjunto de variables correlacionadas se transforma en un sistema de variables no correlacionadas llamadas componentes principales (CP) las cuales pueden describir en un espacio menos complejo la variabilidad total de los datos originales. Esto quiere decir que las transformaciones iniciales de los datos estarán referidas a un nuevo sistema de ejes ortogonales en el cual la varianza en la dirección del primer eje está maximizada. La varianza total de los componentes es igual a la varianza de las variables originales y los CP se ordenan según varianza decreciente.

ÁREA DE ESTUDIO

Dentro del contexto geográfico, el estudio se desarrolló en los departamentos de Valle y Choluteca, al Sur de Honduras, es un rectángulo de una superficie de 6,318.4 km², ubicado en la siguiente coordenada de proyección UTM, en el centroide 479348.3128 E 1668742.421 N (Figura 1). El área comparte para el departamento de Choluteca los municipios de Choluteca, Marcovia, Namasigue y Santa Ana de Yusguare, El Corpus, El Triunfo, Orocuina y Liure y una pequeña fracción del departamento de Valle con el municipio de San Lorenzo. El sector es irrigado principalmente por el río Grande o Choluteca, el río Sampile, Estero Real y río Istoca.

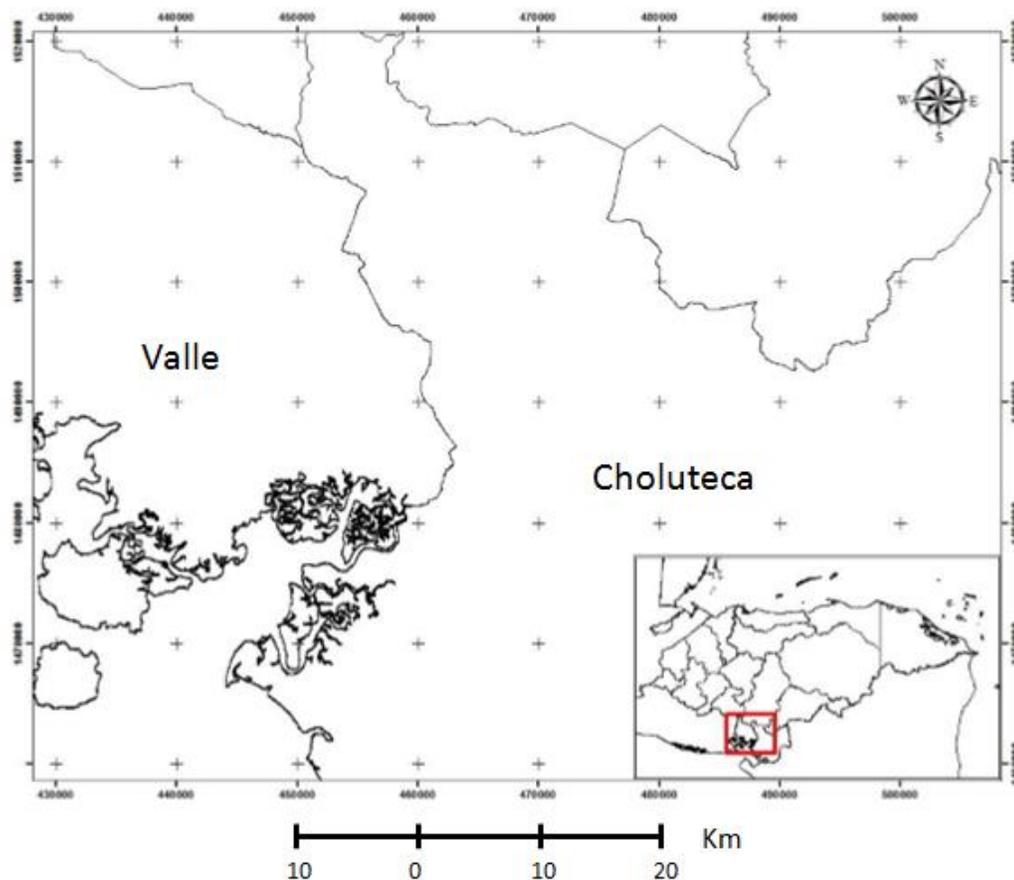


Figura 1. Ubicación Geográfica del Área de Estudio. Elaboración propia.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Situación Problemática

La tendencia de la Percepción Remota ha pasado de sus aplicaciones espaciales extraterrenas a estudios enfocados a nuestro Planeta, una de ellas es la geología por satélite. En el caso de Honduras poco o nada se sabe sobre estos métodos, que a nivel latinoamericano ya alcanzó un nivel de desarrollo académico y empresarial, donde los máximos exponentes se encuentran en Chile, Argentina y México, para citar algunos.

En el país la actividad Minera, es muchas veces especulativa, ya que el país cuenta solo con inventarios de yacimiento minerales declarados y no las debidas prospecciones geológicas, que nos brinden recursos suficientes para establecer un Ordenamiento Territorial, que incluya la gestión integral del riesgo en base a las características geológicas de nuestros suelos.

Un estudio previo en el Sur de Honduras, mostró como la identificación de alteraciones hidrotermales por cocientes de imágenes puede ayudar a determinar cambios del uso del suelo, por presencia de materiales ferrosos.

Formulación del problema de investigación

No existen en el país estudios y metodologías de Percepción Remota con técnicas de Análisis Digital de Imágenes (ADI), para la búsqueda de cráteres e identificación de sus orígenes de formación, dejando vacíos de información en campos como Geografía Física, Gestión de Riesgos, Geomorfología, Geología hondureña, Historia Natural, Ordenamiento Territorial.

Con el desarrollo de esta metodología y la identificación de estructuras geológicas especialmente de cráteres, se estarían contestando las consultas sobre la existencia o no de cráteres y en base a los materiales encontrados en ellos indicarnos su origen.

Preguntas de Investigación

¿Es posible identificar cráteres o cicatrices de cráteres a través de medios de percepción remota?

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Objetivo general

Establecer una metodología para la búsqueda e identificación de cráteres en el Sur de Honduras a través de las técnicas de Análisis Digital de Imágenes de satélite y su tipificación por firma espectral del contenido de materiales en su interior.

Objetivos específicos:

1. Definir las técnicas adecuadas de Análisis Digital de Imágenes (ADI) con filtros de bordes, Análisis de Componente Principal (ACP) y Modelos Digitales del Terreno (MDT o DEM, por sus siglas en inglés) para la detección de cráteres.
2. Integrar los resultados obtenidos en un Sistema de Información Geográfico SIG, para su mejor manipulación y visualización.

Justificación de la Investigación

El uso de las Tecnologías de la Información Geográfica, está cambiando la forma de hacer ciencia, pasando de una forma analógica a una digital, esto sumado a las cada vez más utilizadas técnicas de Percepción Remota, que permite realizar

análisis de sitios difíciles de acceso a través de Imágenes de la Tierra, adquiridas por sensores transportados por plataformas aéreas o espaciales.

La contribución de la Percepción Remota, especialmente de las técnicas de ADI, como métodos no invasivos, disminuyen el impacto provocado en estudios de inducción geológica, arqueológica y de arqueo-astronomía, permitiendo una mayor conservación de estructuras, artefactos (arqueológicos) y edificios geológicos.

El proyecto, intenta generar una nueva metodología para que la comunidad científica tenga alternativas en investigación. Así como, de una reconstrucción histórica de la formación de los suelos de la zona sur de Honduras.

HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

El uso de Tecnologías de la Información Geográfica, permite desarrollar nuevas metodologías para la extracción de características típicas de estructuras geológicas como cráteres, estos resultados se pueden verificar por el contenido espectral de materiales presentes únicamente en este tipo de formaciones, más si contamos que la zona de estudio se encuentra relativamente cerca del cinturón de fuego del Golfo de Fonseca, podríamos decir que de existir cráteres, estos serían de origen volcánico.

MARCO CONCEPTUAL

Este Capítulo, trata de conceptualizar la nueva visión de una Gestión Integral del Riesgo, con procesos de Desarrollo Sostenible, a través de enfoques de Ordenamiento Territorial y de adaptación al Cambio Climático, respecto al tema de estudio, que corresponde a las formaciones producto de la geología de la zona Sur de Honduras y los métodos de Percepción Remota, para detectar específicamente formaciones de cráteres volcánicos de difícil identificación visual.

GESTIÓN DE RIESGOS

Una de las conceptualizaciones de gestión del riesgo, la define como el proceso de identificar, analizar y cuantificar las probabilidades de pérdidas y efectos secundarios a consecuencia de los desastres, así como de las acciones preventivas, correctivas y reductivas correspondientes que deben emprenderse. El riesgo es una función de dos variables: la amenaza y la vulnerabilidad (Cuadro1). Ambas son condiciones necesarias para expresar al riesgo, el cual se define como la probabilidad de pérdidas, en un punto geográfico definido y dentro de un tiempo específico. Mientras que los sucesos naturales no son siempre controlables, la vulnerabilidad sí lo es, (Keipi, K., S. Mora, P. Bastidas, 2005).

Cuadro 1. Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo. Modificado de Keipi, K., S. Mora, P. Bastidas. 2005.

AMENAZA NATURAL (A)	VULNERABILIDAD (V)
Procesos o fenómenos naturales con suficiente intensidad, en un espacio y tiempo específico, para causar daño.	Condiciones resultantes de factores físicos, socioeconómicos y ambientales que aumentan la susceptibilidad de la comunidad a los impactos de amenazas.
CONTROLABLE O PARCIALMENTE CONTROLABLE	CONTROLABLE
RIESGO (A,V)	
Probabilidad de pérdidas físicas, socioeconómicas y ambientales como resultado combinado de la amenaza y la vulnerabilidad	

En la actualidad para los procesos de planificación territorial la gestión del riesgo en nuestro país es tomada en cuenta como proceso social y parte integral de las estructuras institucionales y organizaciones que tienen por objetivo la reducción y control de factores de riesgo que actúan en la sociedad, a través de la aplicación de políticas, estrategias e instrumentos articulados con iniciativas de desarrollo sostenible y amigables con el ambiente (GIZ, 2016). Este proceso no es único de Honduras, ya que la región Centroamericana, también es parte activa en este proceso, los cuales están integrando a la gestión del riesgo dos aspectos de mucha importancia por la trascendencia situacional de Centroamérica: La Adaptación al Cambio Climático (ACC) y el Ordenamiento Territorial (OT).

La Gestión Integral del Riesgo (GIR), se vuelve un proceso más amplio a solo atender emergencias una vez que ha ocurrido un desastre, para volverse verdaderamente activa, antes durante y después de ocurrido el desastre, a través de instrumentos tales como planes, programas, y proyectos que respondan a una política de desarrollo.

Teniendo en cuenta una Gestión Integral del Riesgo, actualizada y basada a nuestro entorno, es conveniente conocer como se deben entender los conceptos que atañen a la GIR:

Amenaza: Factores de riesgo, de origen natural o antrópico o mixto, que expresan la posibilidad de que un fenómeno se presente con cierta intensidad en un sitio específico, dentro de un período de tiempo determinado. En la Región Centroamericana las principales amenazas son las inundaciones, deslizamientos, sequías, incendios forestales, terremotos y erupciones volcánicas, estas dos últimas con poca o nula influencia para Honduras (GIZ, 2016). Las amenazas naturales se agrupan por su origen en geológicas, las que derivan de la dinámica interna de la tierra; y de origen hidrometeorológicas, las que derivan fenómenos climatológicos. Amenaza

también puede entenderse según GIZ, 2013, como el “peligro latente que representa la probable manifestación de un fenómeno físico de origen natural, socio natural, o antropogénico, que se anticipa y puede producir efectos adversos en las personas, la producción, la infraestructura, y los bienes y servicios”.

Vulnerabilidad: Esta es definida como la propensión de los seres humanos y grupos sociales de sufrir muerte, enfermedades, lesiones, daños, pérdidas en sus bienes, medios y modos de vida y encontrar dificultades para recuperarse rápidamente.

Exposición: Son sistemas o elementos que se encuentran en áreas donde se presentan amenazas y que involucran la población, esto incluye contexto social y material (recursos, producción, infraestructuras, bienes y servicios), sujetos a afectaciones por fenómenos físicos.

Desastre: Evento o proceso social que se desencadena como resultado de un fenómeno de origen natural, socio natural que al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en una población, en su infraestructura y estructura productiva, provocando alteraciones que no pueden ser resultadas con los recursos propios de la zona afectada.

Riesgo: La definición general de riesgo en el contexto de la capacidad resiliente y de los procesos clave relacionados con el desarrollo; es la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas. Donde Riesgo es igual Amenaza por Exposición por Vulnerabilidad, por lo que la ausencia de las tres variables implica ausencia de Riesgo. Según GIZ (2016) existe una construcción social del riesgo, indicando que cualquier posibilidad de impacto por desastre, está asociada a condiciones sociales en el territorio y la forma en que los

diferentes grupos sociales interactúan con el uso del territorio. En base a esto, la gestión de riesgos es en definitiva un enfoque de desarrollo y asume temas como el de inequidades propias del modelo de desarrollo de un territorio. Distinguiendo entre una gestión correctiva del riesgo y otra gestión prospectiva del riesgo. La primera pretende reducir los niveles de riesgo existentes en la sociedad, producto de procesos históricos de ocupación del territorio, de fomento a la producción, construcción de infraestructura, entre otras. La Segunda pretende prever el riesgo que podría construirse asociado a nuevos procesos de desarrollo e inversión, tomando las medidas para evitar que surjan nuevas condiciones de riesgo, lo que la convierte en parte integral de la planificación territorial participativa, evitando la gestión correctiva futura.

El análisis del riesgo es el resultado de relacionar la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar los posibles efectos y consecuencias sociales, económicas y ambientales asociadas a uno o varios fenómenos peligrosos en un territorio y referentes a grupos sociales y economías particulares. Por lo que una adecuada gobernabilidad de la gestión del riesgo es necesaria para el desarrollo humano en nuestro país.

Actualmente la gestión del riesgo cuenta con un marco legal, iniciando por la Constitución de la República donde se establece el derecho a la integridad física y la vida y el derecho a la seguridad (art. 61, art.65, art. 68). También se establece el concepto de bien común (art. 62).

En 1993 se creó COPECO, cuya función principal es la atención a las emergencias (art. 5 de la ley de contingencias), y de prevención. En el año 2009 se definen responsabilidades y estrategias para transversalizar la gestión de riesgo en la planificación del desarrollo con la implementación de la Ley del SINAGER, plantea la elaboración de un plan nacional de de gestión de riesgo. La elaboración de este

plan es una oportunidad para la creación de indicadores y metas que permitan monitorear la gestión de riesgo en el país, al mismo tiempo hemos avanzado a nivel local con la ley de municipalidades (decreto 134-90) donde se establecen competencias en lo referente a la implementación de los planes de desarrollo municipales y en la planificación urbana (art. 13).

Finalmente con la ley de ordenamiento territorial (decreto 180-2003) se amplían las competencias de las alcaldías en la temática de gestión de riesgo a través de los planes de ordenamiento territorial (art.27), los cuales incluyen una temática de gestión amplia del ordenamiento territorial en el ámbito municipal, a efecto de promover las condiciones más apropiadas para el desarrollo y la calidad de vida de una comunidad (Suarez, G., W. Sánchez. 2012).

Con respecto a la integración de la Gestión del Riesgo y la Adaptación al Cambio Climático (ACC), es uno de los desafíos más difíciles de enfrentar por parte de la humanidad. Las causas están ligadas al consumo de energía y sus consecuencias se evidencian en aspectos como la salud, producción de alimentos, diversidad biológica y ocupación del suelo, incrementando los Gases de Efecto Invernadero (GEI) en nuestra atmósfera.

La problemática surge del desequilibrio producto de las actividades humanas el cual está generando un exagerado aumento de los GEI, provocando procesos de calentamiento global, desatando complejos impactos en el funcionamiento de nuestro planeta, particularmente una alta variabilidad en los patrones regulares del clima en diferentes escalas (escala global, regional y sobretodo local).

Las acciones para la ACC, que los diferentes países están tomando se pueden reducir en:

1. Procurar lugares sostenibles para la infraestructura estratégica;

2. Facilitar la accesibilidad y movilidad de los grupos más vulnerables de la sociedad; y
3. Gestión eficiente de los recursos

El Cambio Climático produce una dinámica más compleja para el análisis del riesgo, evidenciando la relación directa entre desarrollo, incremento de amenazas y vulnerabilidad. A nivel internacional se visualizan dos grandes estrategias para incorporar el Cambio Climático a las políticas públicas, incluyendo la planificación de Ordenamiento Territorial (Mitigación y Adaptación):

Mitigación: Son el conjunto de modificaciones en la cotidianidad de las personas y en las actividades económicas, con el objetivo de lograr una disminución en las emisiones de GEI a fin de reducir o hacer menos severo los efectos de los cambios climáticos. La IPCC (2007a), la define como una intervención antropogénica para la reducción de las emisiones de GEI, o bien aumentar sus sumideros.

Adaptación: Es el proceso de cambio de actividades, comportamientos y uso de los recursos en razón de los cambios en el clima global, o como la conoce la IPCC (2007b), aquel ajuste en los sistemas naturales y humanos como respuesta a los estímulos climáticos reales o previstos o a sus efectos, que mitigan daños o se aprovechan de oportunidades beneficiosas.

Para desarrollar las estrategias de mitigación y adaptación, se debe hacer énfasis en algunos enfoques complementarios al la Gestión Integrar del Riesgo:

Resiliencia: Capacidad de una sociedad, ecosistema de absorber un impacto negativo o de recuperarse una vez haya sido afectada por un fenómeno físico, la resiliencia desde el punto de vista del ordenamiento territorial, se

traduce a acciones de zonificación de áreas de amortiguamiento, zonas de protección, delimitaciones de zonas inundables con usos alternativos, reservas en el recurso suelo, protección de infraestructura y equipamientos estratégicos, normativas para tratamiento de residuos sólidos, así como para tratamiento de aguas residuales y gestión de drenaje de los fenómenos climáticos.

PROCESOS DE VULCANISMO

La historia de la Tierra registra la formación de mesetas de este tipo en Siberia (250 m.a.), Sudáfrica, Sudamérica (Paraná), la India (65 m.a.) y otros. Algunos autores como Millard Coffin y Olav Eldholm, quienes con buenas evidencias, incluyendo dataciones precisas, consideran que las grandes erupciones que formaron estos relieves se produjeron en lapsos geológicos muy breves, del orden de 1-1.5 millones de años y, además pudieron coincidir con algún fenómeno catastrófico, como la colisión de un gran meteorito. Sin embargo, también existe la explicación de que los fenómenos volcánicos debieron ser de mayor magnitud debido a condiciones distintas de las actuales, donde una temperatura del manto, superior a la actual, pudo favorecer un volcanismo mucho más intenso. (<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/54/htm/lasuper.htm>).

Los daños que pueden causar las erupciones volcánicas están relacionados con varios fenómenos:

1. Los derrames de lava, las lluvias de material piroclástico (principalmente ceniza) y las nubes ardientes o flujos piroclásticos.
2. Las corrientes de lodo (lahares) provocadas por material volcánico suelto y agua en grandes cantidades (por lluvias, desbordes de lagos, derretimiento de la nieve y

el hielo), se producen con velocidades promedio de 40 a 77 km/h y alcanzan distancias aproximadas de 14 km.

3. Por sismos relacionados con la actividad volcánica.

4. Por tsunamis (olas gigantes).

Algunos datos sobre las zonas de alta concentración de volcanes activos en la Tierra son los siguientes: en las islas japonesas Hokkaido, Honsiú, Kiusiú y Riukiú hay 55; en el país más pequeño de Centroamérica, El Salvador, hay 11; en la isla de Java, 35; en Islandia 40. El 80% de los volcanes activos se encuentra en el Cinturón de Fuego del Pacífico. Las erupciones volcánicas generalmente se anuncian con tiempo, con sismos frecuentes. El relieve también puede ser un índice: se ha observado que antes de una erupción se producen deformaciones en el suelo: levantamientos, hundimientos, cambios pequeños en la pendiente del volcán. (Lugo, 1996).

Geotectónica en el Sur de Honduras: La Provincia de Sierras y Mesetas Volcánicas de Honduras, ocupa la porción sur occidental del país, fronteriza con la República de El Salvador y Nicaragua. Consisten de basaltos, andesita, riolita y extensas exposiciones de ignimbrita riolítica que forman cerros y mesetas de suave inclinación hacia el sur-suroeste y profundamente disectadas por erosión. La Provincia morfo tectónica de la Cadena Volcánica del Pacífico cubre una pequeña porción insular y costera del Golfo de Fonseca de Honduras, la cual está asociada con las fallas graben de rumbo noroeste de la Depresión Central de El Salvador y la Depresión de Nicaragua que convergen en el Golfo de Fonseca (Elvir, 1997).

Dentro de la formación de rocas volcánicas características del Terciario, el comportamiento del magma basálticos tuvo relativamente baja viscosidad y bajo contenido de gas, lo que en los volcanes basálticos, la efusión de lava es tranquila y la cantidad de material piroclástico liberado durante el proceso muy pequeño. Hay dos excepciones a esta regla que son: que las nuevas erupciones pueden iniciarse

con una fase explosiva en que el magma y los gases fuerzan la salida hacia la superficie, y otro caso es que si el material volcánico caliente se pone en contacto con agua subterránea o agua de mar, se genera actividad freática o freato-magmática explosiva, (Toselli, 2010).

El científico francés A. Lacroix propuso en los primeros años de este siglo una clasificación de volcanes basada en la observación de diversas erupciones. Reconoció cuatro tipos principales y los llamó *hawaiano*, *estromboliano* (de Sicilia), *vulcaniano* (de Sicilia) y *peleano* (de la Martinica). Con el tiempo, como normalmente ha sucedido en la geología, la clasificación de Lacroix resultó insuficiente: se reconocieron tipos distintos de actividad, como la de los volcanes de Islandia y el Vesubio (*pliniana*) (Figura 2), además de las submarinas. Por otro lado, se observó también que un volcán puede tener un tipo de actividad en una época y cambiar en otra. (Lugo, 1996).

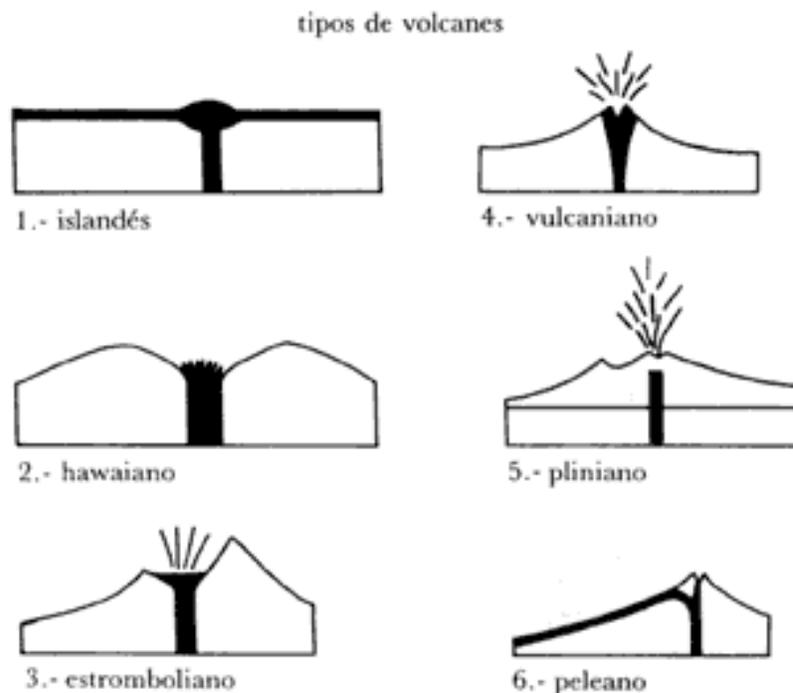


Figura 2. Tipología de volcanes. (Lugo, 1996).

Los tipos principales de volcanes: 1) islandés, derrame de lava por una fisura; 2) hawaiano, erupción de lava por un cráter; 3) estromboliano, erupciones explosivas discontinuas; 4) vulcaniano, erupciones explosivas violentas; 5) pliniano (Vesuvio), expulsión de grandes cantidades de material volcánico en grandes cantidades y a altura considerable; 6) peleano, formación de nubes ardientes.

Hoy día se aplican varias clasificaciones para los volcanes, considerando factores como: el tipo de magma que los produce, los procesos que los originan, la duración de la actividad, su estado actual, rasgos superficiales, etc. Los volcanes en sí, se clasifican, por su forma y origen, en: escudos, compuestos, conos de tefra y domos. Sin embargo, por comodidad y costumbre se sigue utilizando la terminología de Lacroix, ya enriquecida. (<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx>)

Rocas Piroclásticas: Las características de los flujos piroclásticos son altamente variados a consecuencia de las diferentes condiciones bajo las cuales se producen los transportes y la deposición de los materiales erupcionados. En relación a la influencia que el agua ejerce sobre la actividad volcánica, se reconocen explosiones hidromagmáticas o freatomagmáticas y las magmáticas (Figura 3).

Los magmas con alta viscosidad y alto contenido de gases disueltos tienen estilos de erupción menos tranquilos y uniformes que los basálticos. El escape de gas disuelto desde el magma es espasmódico y la eyección de bombas y la formación de conos adventicios, que son pequeños conos, formados generalmente por material basáltico, desarrollados sobre pequeñas fisuras o escapes. (Lugo, 1996).

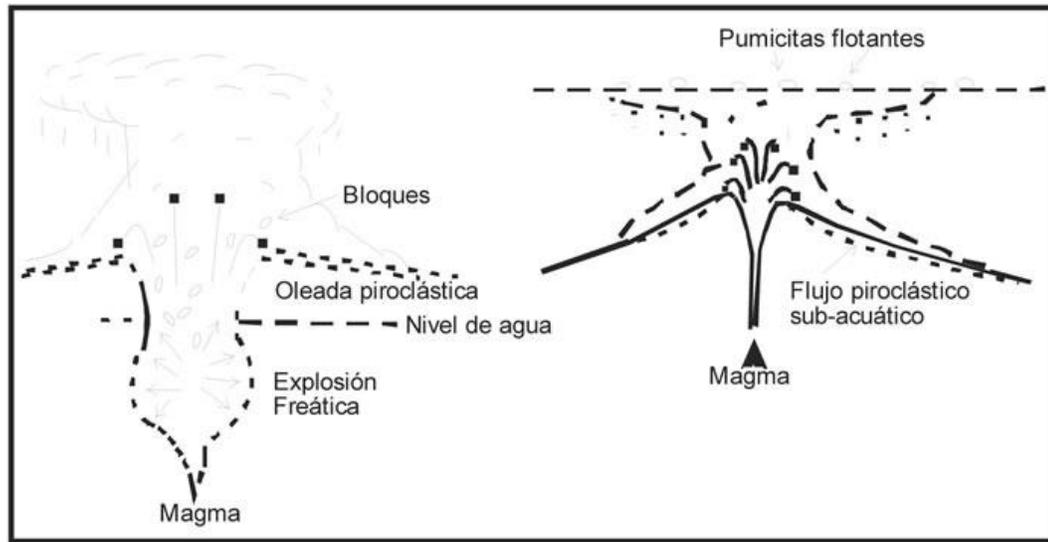


Figura 3. Ilustración de explosión freatomagmática y sub-acuática. (Lugo, 1996).

Los eventos eruptivos limitados no son comparables con las grandes provincias ígneas. Algunas de estas formas se ilustran en las figuras 4, e incluyen conos piroclásticos, tales como los conos de escoria y los conos de ceniza (Figura 4.A), que son el resultado de la acumulación de ceniza, lapilli y bloques que caen alrededor de un orificio de salida y que asocian con actividad explosiva débil.

Un Maar (Figura. 4.B) es típicamente más bajo que un cono de escoria y tiene un cráter central mucho mayor, en relación al anillo de escombros. Los Maars resultan de la interacción explosiva del magma caliente con el nivel freático, que produce ráfagas de vapor y son llamadas erupciones hidromagmáticas o freáticas (Figura 4.C). Notar que la fuerza de la explosión es aportada por el agua subterránea y no por el agua contenida en el magma fundido. Los geólogos comúnmente usan los términos “agua meteórica” y “agua juvenil”; la primera se refiere al agua superficial o subterránea de origen meteórico y la segunda se utiliza para el agua contenida en el magma. Un Maar tiene como característica primaria una topografía negativa, ya que la erupción excava el cráter dentro del substrato original. Los anillos de toba y conos de toba son el resultado de las interacciones entre magma y agua.

Los anillos de toba (Figura 4.C) se forman cuando magma basáltico asciende hasta niveles más próximos a la superficie, que en el caso de los Maars, antes de interactuar explosivamente con aguas someras o agua superficial. Esto involucra también una mayor relación de magma a agua que en el caso de los Maars, formando un anillo bajo de escoria y ceniza, con material piroclástico bandeado, que inclina hacia adentro y hacia fuera con aproximadamente el mismo ángulo.

Los conos de toba (Figura 4.D), son más pequeños que los anillos de toba, con lados empinados y cráteres centrales pequeños. Ellos se forman cuando el magma interactúa con niveles superficiales de agua, siendo generalmente menos violentos y de mayor duración que los maars y anillos de toba. Están formados por escoria y tienen bandeado que buza tanto hacia adentro del cráter, como hacia fuera.

Cráter: Existen dos procesos que le dan origen a un cráter volcánico: Por explosión, donde los gases calientes asociados a la actividad volcánica, crean presión y arrancan el material rocosa de la parte superior del cono volcánico, o de su ladera; Por hundimiento, cuando a roca fundida en su interior (magma) no puede soportar el peso del magma o roca que tiene en su parte superior, misma que había sido expulsada durante los procesos de erupción, y de esta manera todo el material se desploma sobre el espacio que ocupaba el magma, formando así, un cráter. (Cráter, consultado en febrero de 2016, en: <http://www.ecured.cu/Cr%C3%A1ter>).

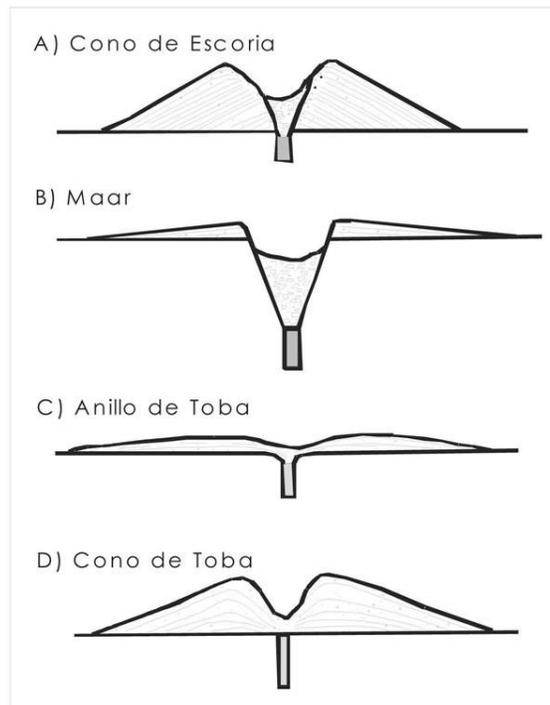


Figura 4. Estructuras y morfologías de formas volcánicas explosivas pequeñas.
(Lugo, 1996)

En el centro de muchos volcanes se han formado depresiones; las que tienen menos de un kilómetro de diámetro y se las denomina cráteres, mientras que a las mayores de varios kilómetros de diámetro se las llama calderas. La mayoría de los cráteres ubicados en el ápice de los conos volcánicos, son abiertos por la actividad explosiva que las abre. Mientras que las de tamaño mayor, que constituyen las calderas, se forman por la subsidencia de la cámara magmática que se encuentra por debajo y es parcialmente vaciada.

Calderas: Una caldera se define “como una gran depresión volcánica de colapso, más o menos circular o con forma de circo, cuyo diámetro es muchas veces mayor que cualquier cráter o cráteres juntos incluidos en ella”. Un cráter puede recordar a una caldera en su forma, pero es mucho más pequeño y difiere genéticamente ya

que es una forma de construcción, más que un producto de destrucción. P.ej. el Cerro Galán en la Puna de Catamarca tiene aproximadamente 40 km de diámetro.

Las calderas o valles caldera (Figura 5), se habrían formado siguiendo una serie de pasos que comienzan con, a) la intrusión de magma en niveles someros de la corteza continental, con desarrollo de domamiento del techo y formación de un sistema de fracturas en anillo, b) erupción de material piroclástico riolítico desde las fracturas en anillos y parcial evacuación de la cámara magmática, c) colapso del techo de la caldera, a lo largo de las fracturas en anillo del techo y relleno parcial de la caldera por deslizamiento de paredes inestables, erosión, depositación de sedimentos lacustres y depósitos piroclásticos post-caldera y lavas. El bloque se hunde intacto a aproximadamente 1 Km, como si fuera un pistón, d) Levantamiento resurgente, domamiento y fracturación del bloque central debido a la renovación de la actividad magmática, con extrusión de lava riolítica viscosa, en forma de domos, desde fracturas en anillo periféricas al bloque central, formando domos resurgentes. Aquí se presume que la actividad magmática ha muerto, pero persiste la actividad geotérmica en forma de geiseres.

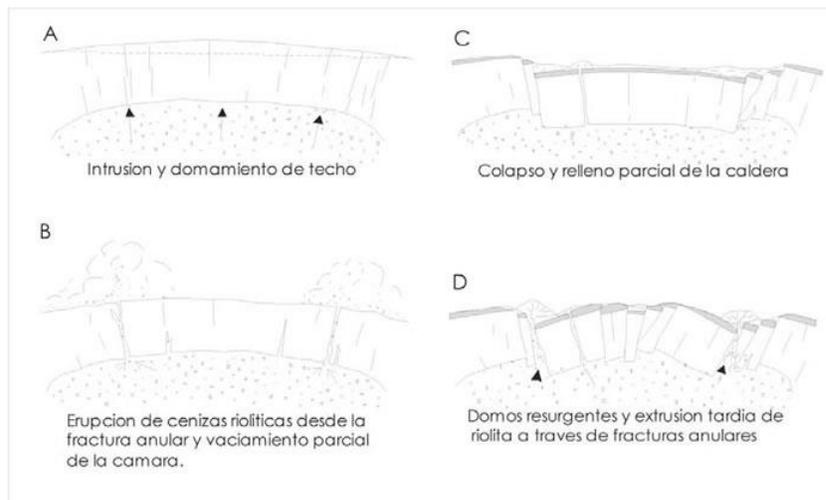


Figura 5. Evolución esquemática de un valle caldera. (Lugo, 1996).

En ocasiones, la lava ascendente se enfría en el subsuelo, cerca de la superficie o derramándose sobre las laderas del edificio, en cortas distancias. Es el proceso de formación de los domos volcánicos.

A raíz de la descripción de un cráter de grandes dimensiones, de más de 5 km de diámetro en las Canarias, que lleva el nombre de La Caldera, el término se extendió a las formas semejantes. Originalmente, la diferencia entre una caldera y un cráter fue sólo por el tamaño: el cráter volcánico pocas veces alcanza los 2 km de diámetro; de mayores dimensiones se consideraba la caldera. Hoy día se define a ésta como una depresión, más o menos circular que se origina por hundimientos con dos posibles explicaciones, Figura 6:

1. Las erupciones explosivas que arrojan una gran cantidad de material magmático pueden provocar un vacío en la chimenea por donde asciende, a lo que sigue un hundimiento de la superficie, con lo que el cráter se amplía.
2. El cráter sufre rupturas concéntricas y posterior hundimiento en bloques. A esto puede seguir la actividad volcánica.



Figura 6. Formación de cráteres y calderas. (Lugo, 1996).

PERCEPCIÓN REMOTA

La Percepción Remota o Teledetección, como ciencia se ha convertido en una potente herramienta asociada a las diferentes disciplinas técnico científicas, facilitando la extracción de datos y convirtiéndolas en información temática. Para Tindall, 2006, es la ciencia que se encarga de la adquisición de información a través de sensores sin entrar en contacto directo entre el sensor y el objeto o fenómeno sujeto de estudio. Generalmente consiste de un sistema fotográfico u óptico electrónicos capaces de detectar y registrar, en forma de imágenes o no, el flujo de energía radiante reflejado o emitido por objetos distantes, (Figura 7).

Si describimos dicho sistema de percepción remota, tendremos los siguientes componentes: 1) Fuente de energía; 2) interacción atmosférica de la energía; 3) Cobertura de la tierra que refleja y absorbe energía; 4) Sistema sensor; 5) Transmisión Recepción de la señal; 6) Distribución y comercialización de información y 7) Interprete o usuario final.

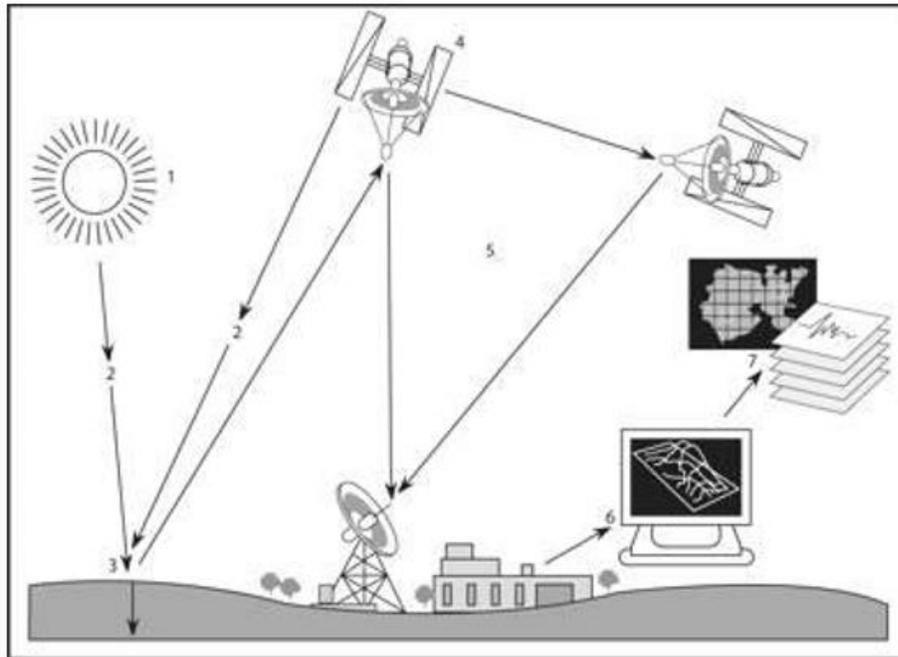


Figura 7. Sistema de Percepción Remota. (Tindall, 2006).

Leyes Físicas de la Radiación Electromagnética

La fuente de energía principal en un sistema de Teledetección es la radiación solar, misma que pasa por interacciones con la atmósfera y la tierra. Según la Ley de Planck la energía Q_i de un cuerpo negro (para dar una determinada temperatura de emisión) en función de la frecuencia de la emisión "f" (por tanto su longitud de onda).

$Q_i = \hbar \cdot f$ siendo $\hbar =$ cte de Planck

Tanto el flujo radiante, como la emitancia depende la la longitud de onda (λ) emitida. Planck definió la emitancia de un cuerpo negro para una λ_i como:

$$M_{n,\lambda} = \frac{2\pi\hbar c^2}{\lambda^5} \left[\frac{1}{e^{\frac{\hbar c}{\lambda K T}} - 1} \right]$$

Siendo: $\hbar =$ cte de Planck $6.266 \times 10^{-34} \text{J.s}$

$K =$ cte de Boltzman $1.38 \times 10^{-23} \text{ws}^2 \cdot \text{k}^{-1}$

$T =$ Temperatura absoluta de cuerpo negro en grados Kelvin ($^{\circ}\text{K}$)

La Ley de Desplazamiento de Wien, define la λ_i a la que se emite a la máxima cantidad de energía (λ_{max}) en función de la temperatura del foco emisor:

$$\lambda_{\text{max}} = A/T$$

Donde $A = 2898 \mu\text{m} \cdot ^{\circ}\text{K}$; y $T =$ temperatura en $^{\circ}\text{K}$

De manera que si conocemos la temperatura de emisión de un objeto, podríamos conocerla λ en que se emite la mayor cantidad de energía. Si integramos todas las λ , tendremos la Ley de Stefan Boltzman:

$$M_n = \sigma \cdot T^4$$

Siendo σ = la cte de Stefan Boltzman = $5.6697 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

Como la energía incide tanto en las leyes del movimiento ondulatorio y de la teoría cuántica, al fusionar ambos principios tendremos:

$$C = \lambda \cdot f \text{ (Ley Ondulatoria, } C = \text{Velocidad de la Luz)}$$

$$Q_i = \hbar \cdot f \text{ (Teoría de Partículas, } f = \text{frecuencia en Herzios)}$$

$$Q_i = \hbar \cdot c / \lambda \text{ (uniendo ambos principios)}$$

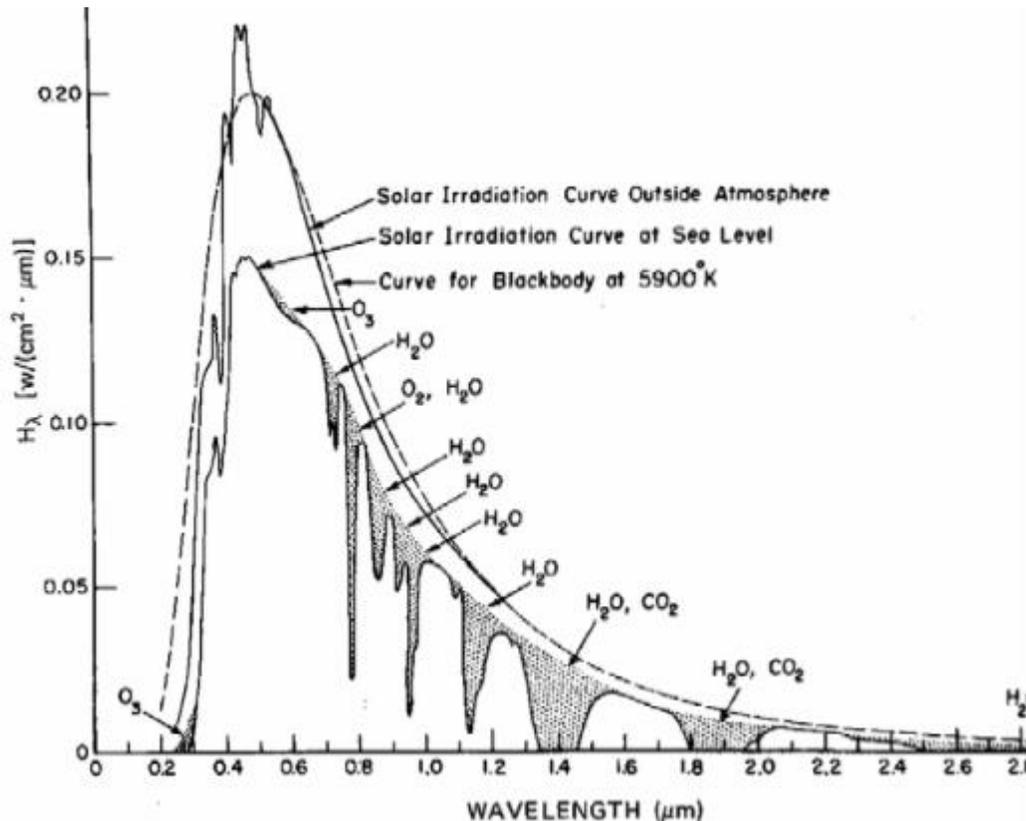


Figura 8. Modelo de Cuerpo Negro del Sol, (Reuter, 2009).

Propagación de la Energía en la Atmosfera y la Terra

La Energía interacciona con la atmosfera, que está compuesta por moléculas gaseosas y partículas en suspensión (CO_2 , O_2 , O_3 , N_2 , Argón y vapor de H_2O). La interacción con estas partículas (Figura 8) produce dos tipos de fenómenos:

Absorción: implica una reducción de la energía debido principalmente al CO_2 , O_2 , O_3 , las zonas del espectro electromagnético donde existe menor absorción, son las destinadas para el diseño de los sensores, estas zonas son conocidas como ventanas atmosféricas (Figura 9).

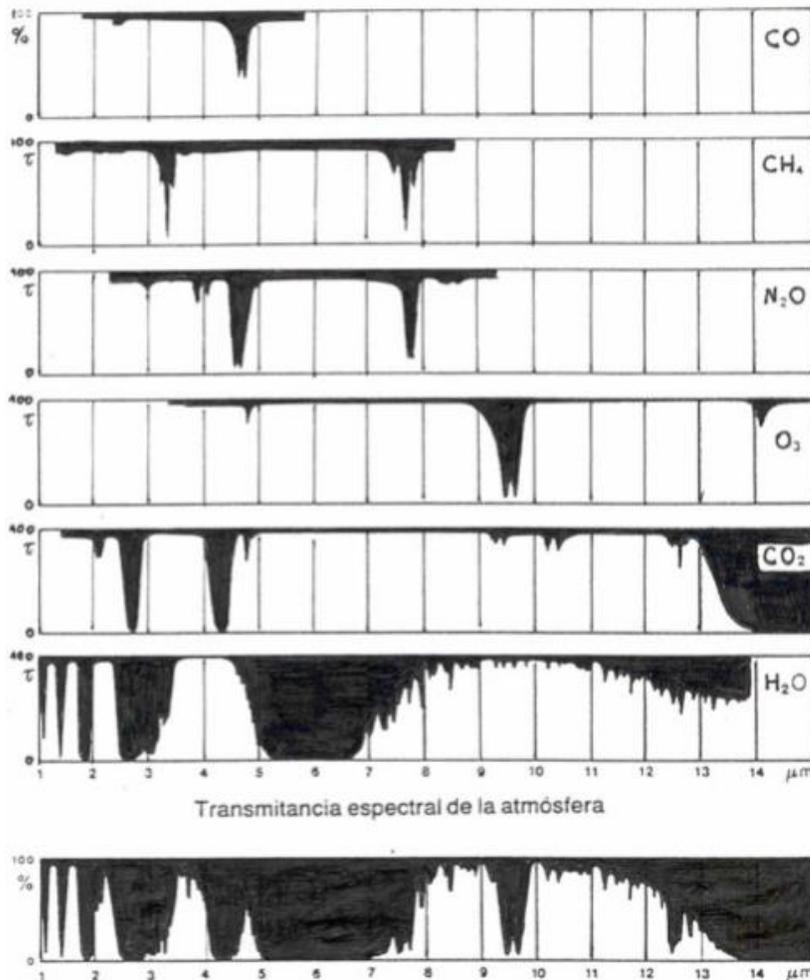


Figura 9. Espectro de absorción de gases atmosféricos. (Reuter, 2009).

Dispersión: en este caso la energía incidente se refleja o refracta, variando su dirección e intensidad (por lo tanto hay una disminución de la misma). Este fenómeno varía según la λ de la radiación incidente y del tamaño de la partícula: Dispersión de Rayleigh, ocurre cuando la longitud de onda es mucho menor que el tamaño de los objetos responsables de la dispersión, afecta por lo tanto a las longitudes de onda más cortas (cielo azul), Dispersión de Mie, cuando la longitud de onda es del mismo orden de magnitud que los objetos dispersos, afecta todas las longitudes de onda del visible (brumas, vapor de agua, polvo y aerosoles) y Dispersión no selectiva, cuando la longitud de onda es mucho menor que los objetos, la producen de agua en la atmósfera (nubes blancas, niebla). Tal como se ejemplifica en la Figura 10.

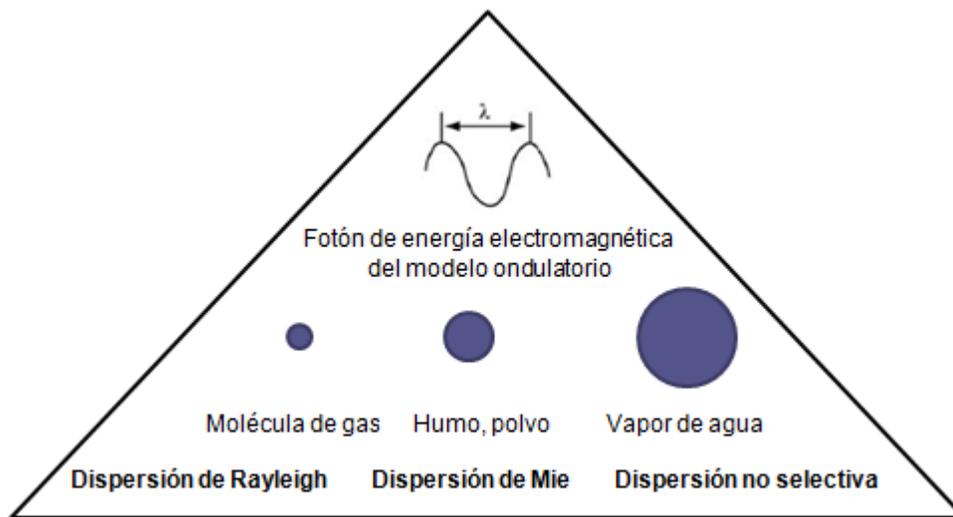


Figura 10. Dispersión de la energía según tamaño de la partícula en suspensión.

En el suelo la propagación depende de la composición, estructura y emplazamiento de los materiales de la superficie terrestre, de la geometría de la observación y de la λ incidente. Todo ello implica que la energía incidente sea Reflejada (forma especular en todas direcciones), Absorbida (que posteriormente se transformará en energía emitida) y transmitida (energía geotérmica).

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Longitud de Onda

Distancia entre dos nodos o dos valles consecutivos de una onda. En el caso de la radiación electromagnética, es el recíproco de la frecuencia de dicha radiación multiplicada por la velocidad de la luz. De su λ derivan la mayor parte de las propiedades de la radiación electromagnética (Figura 11). La clasificación del espectro electromagnético en regiones consiste en la agrupación de aquellos intervalos de λ en los cuales la radiación tiene comportamientos electromagnéticos similares.

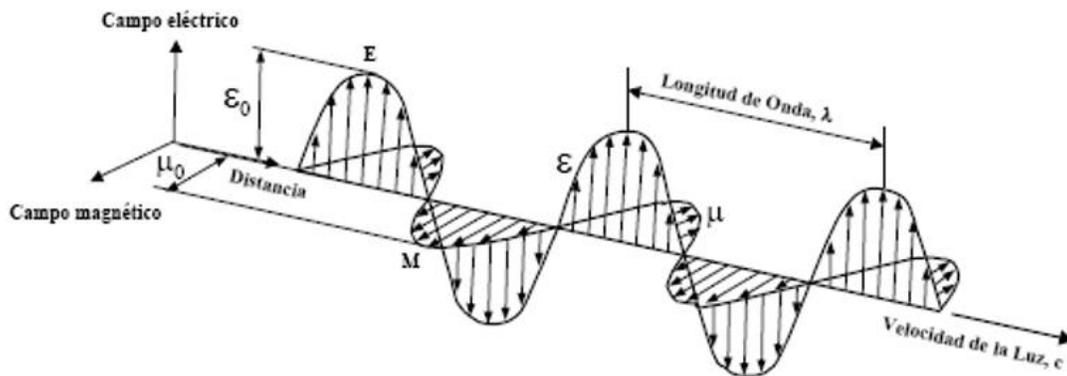


Figura 11. Longitud de Onda, en el espectro electromagnético. (Corrales, 2015).

Imagen Digital

Según Pinilla (1995), es una función discretizada de la imagen analógica, en las dimensiones geométricas, por la generación de celdas por muestreo equiespaciado de la superficie (Figura 12), como en sentido radiométrico, por la asignación de valores enteros o Niveles Digitales (ND), que están comprendidos entre 0 y $k-1$, siendo k el margen dinámico del sistema, determinado a su vez por su resolución radiométrica.

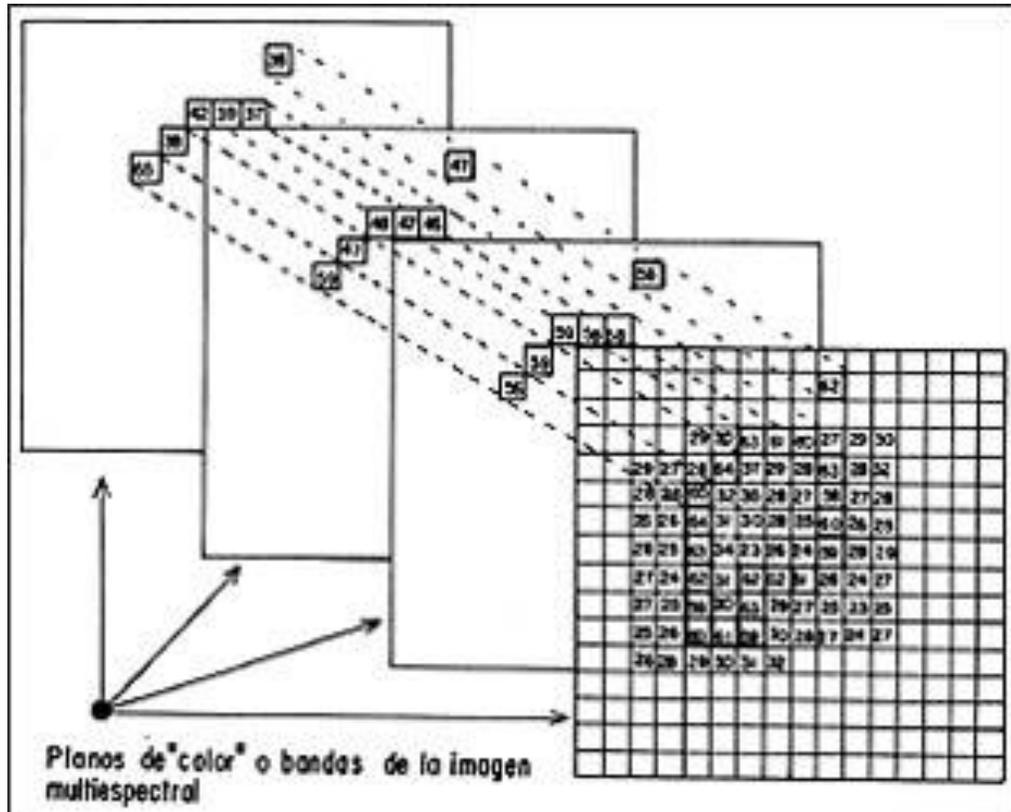


Figura 12. Patrones espacial y espectral de una imagen digital multispectral.

Firma Espectral:

Forma característica del espectro de emisión/reflexión de una determinada superficie. Como cada material posee bandas de absorción diferentes de acuerdo a su composición química, la energía solar reflejada será el complemento a la incidente más la emitida por aquélla. (Corrales R, 2015). En la Figura 13, se puede observar el comportamiento de la vegetación en los diferentes rangos del espectro electromagnético con que se mide la energía refleja y capturada por los sensores.

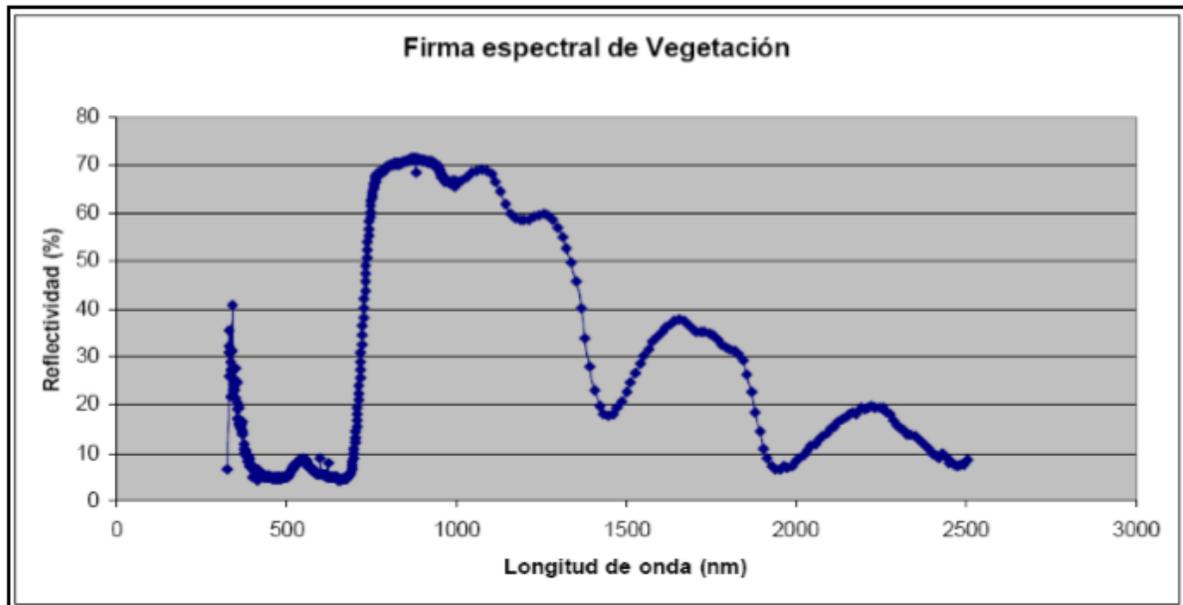


Figura 13. Firma espectral de Vegetación. (Corrales, 2015).

Sistema de Información Geográfico "SIG o GIS"

Es una integración organizada de hardware, software, datos geográficos y personal, diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión. También puede definirse como un modelo de una parte de la realidad referido a un sistema de coordenadas terrestre y construido para satisfacer unas necesidades concretas de información, (GEOINFO). En la actualidad los avances tecnológicos llevan a explorar nuevas herramientas que modifican el esquema clásico de SIG, por uno más adecuado a las innovaciones en las ciencias de la información geográfica, (Figura 14).

Según Michael Dacey, un Sistema de Información Geográfico es cualquier cosa que funciona como un mapa, al comunicar geográficamente la información solicitada por los usuarios del Sistema, (Dacey, 1970).

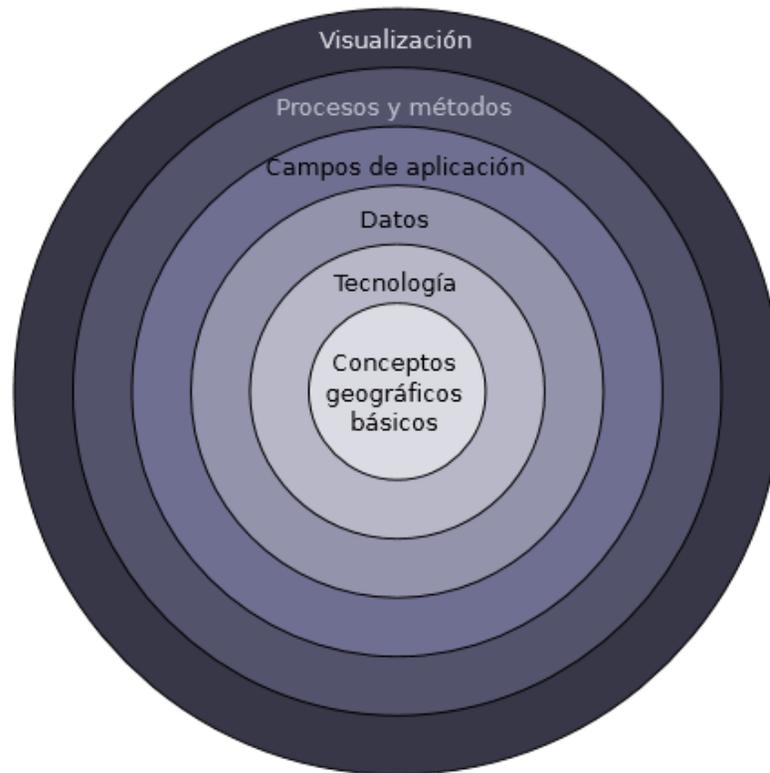


Figura 14. Esquema de un SIG. Olaya, 2011.

Desde su aparición, los SIG, han sido utilizados para resolver problemas geoespaciales de una variedad de ciencias, considerándose desde sus inicios en una herramienta interdisciplinaria (Buzai, et al, 2013). Debido a que en un espacio geográfico encontramos vistas y características individuales, que se miden como entidades y atributos, conformando una secuencia de capas que representan esas entidades a través de formas geométricas básicas (puntos, líneas y polígonos) y sus atributos según sus características como tablas alfanuméricas (bases de datos geográficas), por lo que la finalidad de un SIG es combinar la cartografía digital con la localización de cada entidad con los atributos textuales y numéricos medidos en cada unidad espacial, creando una representación dentro de un sistema de coordenadas geográficas que nos permite obtener información significativa.

Los Sistemas de Información Geográfica, continúan generando muchas posibilidades de análisis espacial, siendo considerada como la tecnología geográfica más importante desde la aparición del mapa. La automatización digital ha provocado ver a los Sistemas de Información Geográfica desde cuatro puntos de vista:

- Orientación al entorno de trabajo como un sistema basado en el uso de computadoras para el tratamiento de datos espaciales.
- Orientación hacia su funcionalidad como un sistema que permite la obtención, el almacenamiento, el tratamiento y el reporte de datos espaciales.
- Orientación hacia su contenido como base de datos que contiene información referenciada espacialmente.
- Orientación hacia su propósito como sistema que sirve de apoyo al proceso de toma de decisiones en materia de gestión y planificación territorial.

Por otra parte los componentes de los Sistemas de Información Geográficos, en su forma más básica se dividen en: A) Software, integrados por los programas y materiales intangibles y B) Hardware, integrados por equipamiento y materiales tangibles, empleados de forma integral aseguran el éxito en su desempeño técnico. Cuando nos referimos a software, hablamos de programas de aplicación empleados en el tratamiento de datos geográficos y búsqueda de resultados. Una aplicación SIG, puede estar conformada por diferentes tipos de software que aseguren su funcionamiento combinándolos con subsistemas de funcionamiento lógico. Hemos de destacar cuatro subsistemas:

1. Almacenamiento y organización de los datos geográficos (espaciales gráficos), esto se logra a través de la digitalización cartográfica manual o

automático o con archivos adquiridos con sensores incorporados en los satélites artificiales que usa la Percepción Remota.

2. Almacenamiento y organización de los datos atributo con localización espacial definida (georreferenciación) por la digitalización grafica y que se organiza en archivos de cómputo los que pueden ser consultados y analizados, actualizados, modificados, o asociados a cartografía digital.
3. Tratamiento de datos: son las diferentes herramientas que presenta un SIG para manipular el contenido de los subsistemas anteriores y realizar procesamientos incluidos como parte de los procesamientos de análisis espacial.
4. Presentación de resultados: es la presentación o despliegue de los resultados encontrados a través de los dispositivos de salida (Layout), sean estos analógicos o digitales (impresiones o pantallas).

De estos componentes el más indispensable es el subsistema de tratamiento de datos lo cual establece lo mínimo que debe tener un SIG para ser funcional, esto permite que los SIG sean flexibles en cuanto a su capacidades totales o mínimas. Otro aspecto a tener en cuenta es el carácter público o privativo de los SIG que podemos encontrar disponibles. Uno de los SIG que se utilizan de forma pública y educacional es QGIS (antes Quantum GIS) y el gvSIG, los que permiten realizar la Mayoría de las funciones de un SIG total.

No olvidando hablar del hardware, que hace referencia a los componentes físicos o duros de una computadora (Unidad Central de Procesamiento, Periféricos de Entrada y Periféricos de Salida), cada vez con mayores capacidades para el tratamiento de datos geográficos.

Otro aspecto a destacar son los modelos de datos que utilizan los SIG para representar la información obtenida de las diferentes unidades espaciales: El modelo de datos ráster y el modelo de datos vectorial.

El modelo de datos ráster divide el espacio geográfico a través de una matriz cuadrículada en donde cada celda contiene información referente a las diferentes características dominantes en sus coberturas. Los SIG ráster integran desde un inicio imágenes satelitales que se generan directamente en este formato, en la cual se realizan diversos procedimientos de análisis espacial. Las características sobresalientes de este modelo de datos son:

- Estructura simple y fue la primera utilizada porque se combinaba fácilmente con los iniciales sistemas de visualización y de impresión.
- Permite realizar fácilmente procedimientos de análisis espacial por superposición de variables temáticas.
- Formato compatible con imágenes satelitales que se han transformado en una importante fuente de datos actualizados.

El modelo de datos vectorial, organiza los datos geográficos en base a la perspectiva de bases de datos relacionadas (relaciones espaciales), lo que permite trabajar digitalmente utilizando las entidades básicas de puntos, líneas y polígonos (áreas), con las respectivas bases de datos alfanuméricas para cada entidad geográfica puntuales, lineales y poligonales. Las principales características identificadas para este modelo de datos son:

- Es una estructura que genera diseños más reales del espacio geográfico en cuestión, al hacer sus representaciones bajo puntos, líneas y polígonos.

- Permite realizar operaciones en las bases de datos alfanuméricas y representarlas bajo parámetros cartográficos.
- Los diseños cartográficos son de excelente calidad y permiten aplicar claramente los conceptos de la cartografía temática.

En la actualidad so podemos hablar de sistemas “purístas” de desarrollo y utilización de Sistemas de Información Geográfica Ráster o Vectorial, siendo capaces de combinar ambos datos, pero con las tendencia hacia uno u otro tipo de modelo de dato.

Generalmente se considera que el formato vectorial es más adecuado para la representación de entidades o variables cualitativas y el formato ráster para representar superficies. Sin embargo esto no es necesariamente así. Para representar superficies podemos considerar hasta cuatro (4) modelos posibles (figura 15):

- Malla regular de puntos, a cada uno de ellos se asigna el valor de la variable medido en el punto.
- TIN (Red Irregular de Triángulos), los puntos se concentran en aquellas zonas donde la variable representada tiene mayor variabilidad.
- Isolíneas (líneas en las que el identificador se sustituye por el valor de la variable).
- Ráster, el área de trabajo se divide en celdillas.

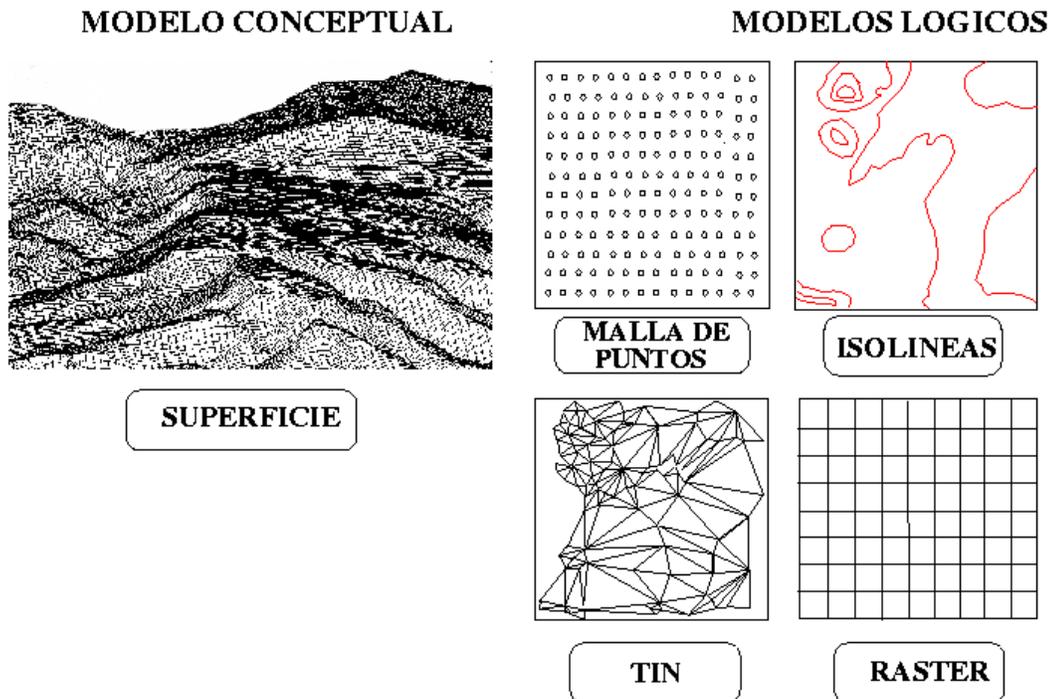


Figura 15. Modelo Lógico de Representación de superficies .Tomado de SIGMUR http://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node25_mn.html.

Los tres primeros son representaciones en formato vectorial ya que se utilizan puntos o líneas para representar variables regionalizadas. El problema fundamental que plantean es que no representan a la totalidad del espacio, por tanto requieren una interpolación más o menos compleja para saber cuál es el valor en un punto concreto. El modelo ráster completa el espacio y la obtención del valor en cualquier punto es inmediata.

Para representar variables cualitativas existen dos alternativas (figura 16) :

- Formato ráster.
- Formato vectorial Arco-Nodo.
- Formato vectorial orientado a objetos, menos adecuado debido a que se introduce mucha información redundante .

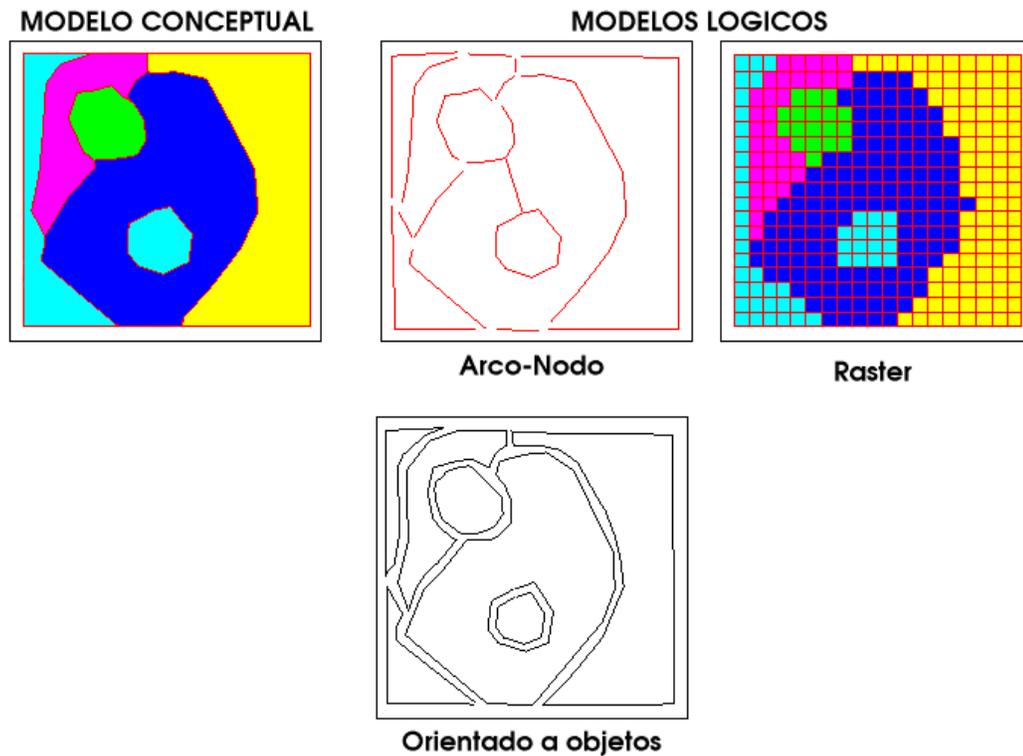


Figura 16 . Modelo Lógico de Representación de variables cualitativas. Tomado de SIGMUR http://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node25_mn.html.

Para representar objetos las alternativas son (figura 17):

- Formato vectorial Arco-nodo u orientado a objetos, si los polígonos no se tocan es lo mismo.
- Formato ráster, en una misma capa no pueden aparecer objetos que coinciden en el espacio

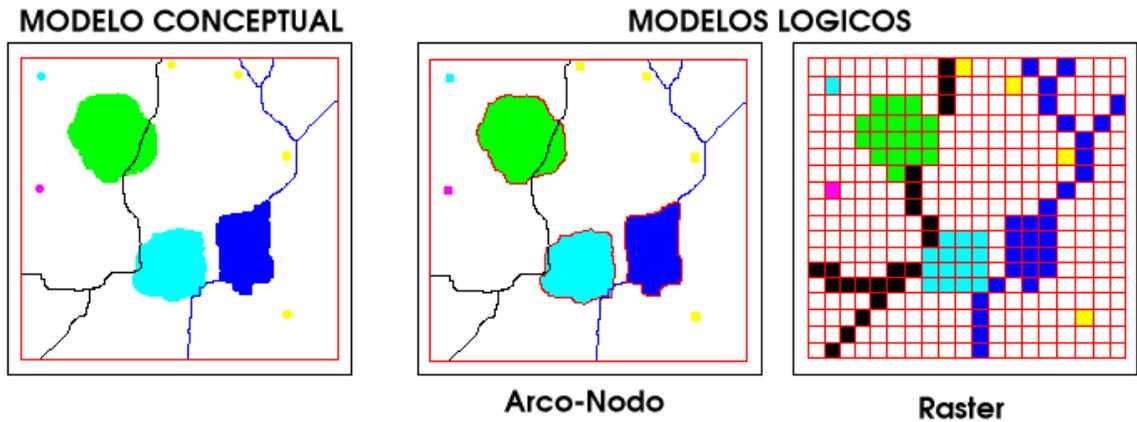


Figura 17. Modelo Lógico de Representación entidades. Tomado de SIGMUR http://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node25_mn.html.

En el caso de variables cualitativas y objetos, el formato raster define de forma explícita el interior y de forma implícita el exterior, en el caso del formato vectorial es al revés.

El satélite Landsat 5

fue puesto en órbita el 1° de marzo de 1984 portando el sensor TM (Mapeador Temático) que opera en siete bandas espectrales diferentes. Estas bandas fueron elegidas especialmente para el monitoreo de vegetación a excepción de la banda 7 que se agregó para aplicaciones geológicas. El Landsat 5 pertenece al programa Landsat, financiado por el gobierno de los Estados Unidos y operado por la NASA.

Banda 1: (0,45 a 0,52 micrones - azul) Diseñada para penetración en cuerpos de agua, es útil para el mapeo de costas, para diferenciar entre suelo y vegetación y para clasificar distintos cubrimientos boscosos, por ejemplo coníferas y latifoliadas. También es útil para diferenciar los diferentes tipos de rocas presentes en la superficie terrestre.

Banda 2: (0,52 a 0,60 micrones - verde) Especialmente diseñada para evaluar el

vigor de la vegetación sana, midiendo su pico de reflectancia (o radiancia) verde. También es útil para diferenciar tipos de rocas y, al igual que la banda 1, para detectar la presencia o no de limonita.

Banda 3: (0,63 a 0,69 micrones - rojo) Es una banda de absorción de clorofila, muy útil para la clasificación de la cubierta vegetal. También sirve en la diferenciación de las distintas rocas y para detectar limonita.

Banda 4: (0,76 a 0,90 micrones - infrarrojo cercano) Es útil para determinar el contenido de biomasa, para la delimitación de cuerpos de agua y para la clasificación de las rocas.

Banda 5: (1,55 a 1,75 micrones - infrarrojo medio) Indicativa del contenido de humedad de la vegetación y del suelo. También sirve para discriminar entre nieve y nubes.

Banda 6: (10,40 a 12,50 micrones - infrarrojo termal) El infrarrojo termal es útil en el análisis del stress de la vegetación, en la determinación de la humedad del suelo y en el mapeo termal.

Banda 7: (2,08 a 2,35 micrones - infrarrojo medio) Especialmente seleccionada por su potencial para la discriminación de rocas y para el mapeo hidrotermal. Mide la cantidad de hidróxilos (OH) y la absorción de agua.

Estas siete bandas pueden combinarse de a tres o más, produciendo una gama de imágenes de color compuesto que incrementan notablemente sus aplicaciones, especialmente en el campo de los recursos naturales. El mapeador temático (TM) tiene mayor sensibilidad radiométrica que su antecesor, el MSS, y mejor resolución espacial, ya que el tamaño del píxel en todas las bandas excepto la 6, es de 30 metros (Figura 18). Esto permite la clasificación de zonas tan pequeñas como 2,5 o 3 hectáreas. La banda 6, que una banda termal, tiene un píxel de 120 metros en el

terreno. Cada imagen cubre 185 x 185 Km. (Imágenes Satelitales LandSat, <http://www.imagenesgeograficas.com/Landsat.html>).

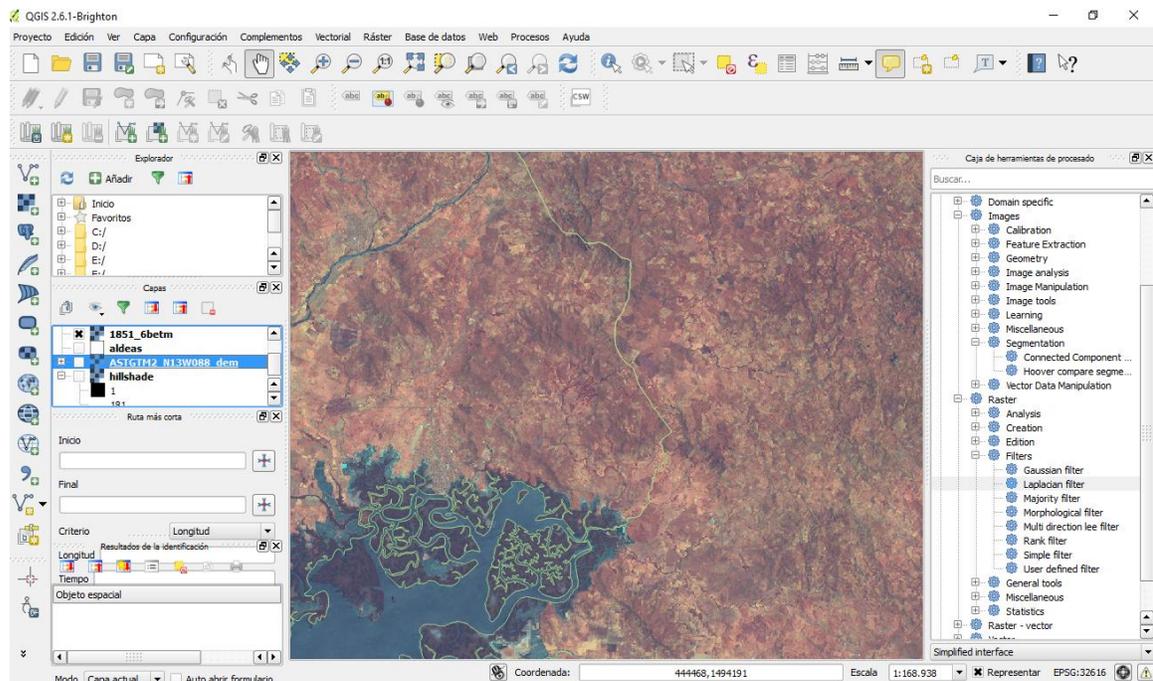


Figura 18. Sección de Imagen LandSat TM, escena p18r51. Elaboración propia

Imágenes SRTM

La misión Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) obtiene datos de elevación a escala global generando una base de datos completa de la tierra cercana a una alta resolución digital. La SRTM consistió en un sistema de radar especialmente modificado que voló a bordo del transbordador espacial Endeavour durante una misión de 11 días en febrero de 2000. La SRTM fue un proyecto internacional liderado por la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA), NASA, la Agencia Espacial Italiana (ASI) y el Centro Aeroespacial Alemán (DLR). Hay tres salidas de resolución disponibles, incluyendo resoluciones de 1 kilómetro y 90 metros para el mundo y una resolución de 30 metros para los Estados Unidos. La Global Land Cover Facility GLCF sirve las principales ediciones de United States

Geological Survey USGS, además ha 'mejorado' ediciones así como ofrece ediciones de mosaico WRS-2 para aproximarse a escenas del Sensor Landsat.

El principal producto de la RSTM son los Modelos Digitales del Terreno MDT, los cuales son una categoría de modelos simbólicos que ha nacido y se ha desarrollado al amparo de las nuevas tecnologías de la Percepción Remota con dispositivos aérotransportables. Los modelos digitales del terreno se han definido (Doyle, 1978:1481) como un conjunto de datos numéricos que describe la distribución espacial de una característica del territorio.

Existen dos tipos de modelos los digitales y los analógicos y su diferencia reside en que los primeros son una codificación cifrada, lo que permite su tratamiento por medios informáticos o análisis digital de imágenes ADI, y para alcanzar la elaboración de los modelos digitales se necesita, por tanto, efectuar un proceso de codificación de la información, que permite una representación virtual en forma de cifras. Las relaciones espaciales o las características que se desean representar se traducen a diferentes tipos de estructuras numéricas de las cuales las más comunes son vectores, matrices, conjuntos, etc. o a expresiones matemáticas que representan relaciones topológicas y funcionales.

Una maqueta, como modelo icónico, también constituye un modelo analógico de la realidad o terreno MAT, en el que se da una especial importancia a la conservación de las proporciones o relaciones espaciales relativas. Un mapa convencional es otro modelo analógico más sofisticado en el que se establecen unas relaciones especiales de simbolización que permiten la abstracción de una realidad tridimensional a un modelo plano.

Los MDT pueden ser contruidos directamente a partir de la realidad que representan, siendo más habitual que exista un modelo analógico intermedio a partir del cual se realiza la codificación. Éste puede adoptar formas diversas, desde los mapas, hasta pares fotográficos estereoscópicos. Por este motivo, los MDT han

sido entendidos como una versión digital (y por tanto codificada) de los mapas convencionales por lo que, en ocasiones, han sido denominados mapas virtuales (Moellering, 1983).

Sin embargo, Doyle es de la opinión que un simple listado secuencial de cotas pueda ser considerado un modelo digital de elevaciones. Asimismo, es necesario realizar alguna limitación en cuanto al tipo de variable representada ya que es discutible que las versiones digitales de los mapas temáticos tales como mapas de vegetación, mapas de infraestructura vial o de puntos singulares puedan ser considerados modelos digitales del terreno. Por lo que en la actualidad la tendencia es a considerar únicamente a una estructura interna que represente las relaciones espaciales entre los datos, y que la variable representada en el modelo debe ser cuantitativa y de distribución continua. De esta manera se excluyen las variables temáticas, y las variables representadas por entidades lineales o puntuales (como, por ejemplo, una red hidrológica).

Para describir la altimetría de un área mediante un conjunto de pisos altitudinales, a través de los MDT. Se utiliza una representación llamada MDE o modelo digital de elevaciones. Así mismo siguiendo la analogía cartográfica, es posible construir un conjunto de modelos derivados, elaborados a partir de la información contenida explícita o implícitamente en el MDE.

Todo dato al ser obtenido por dispositivos remotos, es susceptible de revisión mediante el contraste o verificación del modelo derivado con el objeto real. Este contraste se realiza mediante métodos de análisis del error que, habitualmente, se basan en la comparación de una muestra extraída del modelo derivado con medidas empíricas realizadas sobre el terreno. Los resultados del análisis del error permiten efectuar ajustes en el algoritmo, aumentando su fiabilidad y, por tanto, su capacidad predictiva. Esto significa que un algoritmo sólidamente construido, aplicado sobre un MDT fiable, permite estimar propiedades que pueden ser aplicadas al objeto real

con márgenes moderados de error, aportando información difícil de obtener por otros medios (Figura 19).

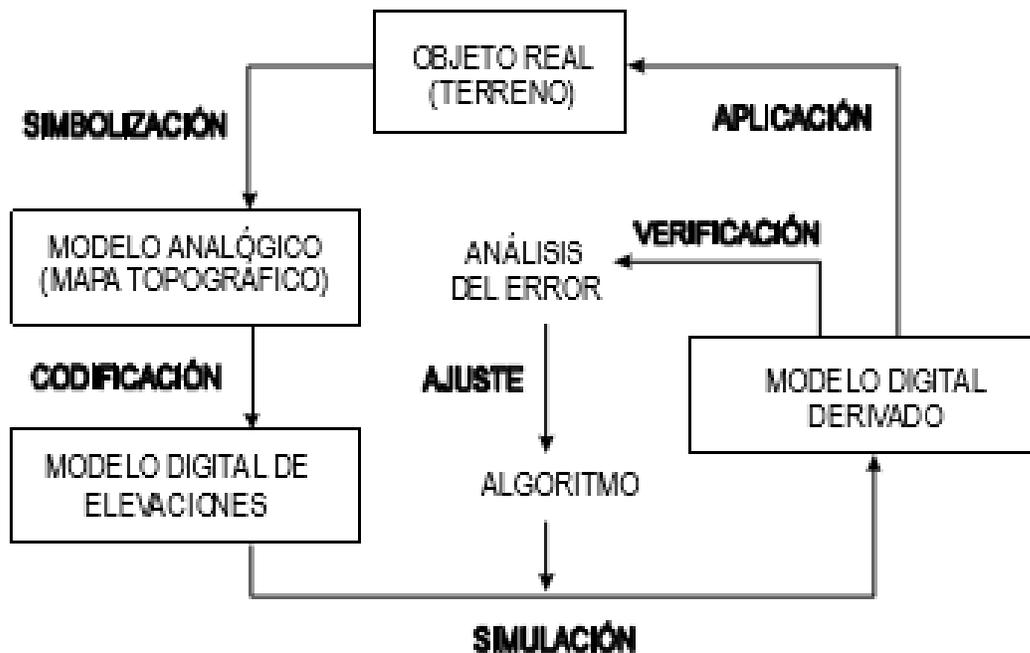


Figura 19. Procesos de un MDE, (Felicísimo, 1994).

Uno de los aspectos del análisis de imágenes, es la posibilidad de poder trabajar un análisis digital de imágenes o análisis visual de imágenes, posibilitando la facilidad de uso o manejo referente a obtener información de forma rápida y sencilla por parte de los usuarios. El acceso a la información impresa en un mapa o desplegada en pantalla es sencillo ya que se realiza directamente mediante unos conocimientos cartográficos más o menos profundos, lo que dependerá de la experiencia del experto.

El acceso a los MDT es mucho más complejo pues se realiza a través de equipos informáticos cuyo manejo, mediante una serie de instrucciones específicas, obliga a un entrenamiento especializado. Idealmente, los conocimientos cartográficos necesarios para la interpretación de los mapas convencionales deben

complementarse con otros relativos a proceso de imágenes, bases de datos, teledetección y programación de software, lo que implica un considerable esfuerzo de educación suplementario, (Felicísimo, 1994).

Entre las características que diferencian los MAT de los MDT en los aspectos prácticos del uso de la información, se describen en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Características del MAT y del MDT.

Propiedad	Modelo Analógico del Terreno	Modelo Digital del Terreno
Manejo	Sencillo	Compleja
Estabilidad	Baja	Alta
Transportabilidad	Alta	Baja
Actualización	Compleja	Sencilla
Tratamiento numérico	Difícil	Fácil
Simulación	No	Si

Tomando las descripciones de las propiedades de los diferentes modelos del terreno hechos por Felicísimo (1994), encontramos que las características físicas de la información, referente a la Estabilidad puede entenderse en un doble sentido: dimensional y temporal. La estabilidad dimensional es un problema específico de los mapas impresos sobre un soporte físico y afecta a uno de los requisitos básicos de los documentos cartográficos: la referenciación espacial precisa, que hace posible localizar con exactitud un elemento cualquiera del terreno. Los MDT y los sistemas que los soportan son independientes, en este sentido, de las condiciones ambientales. La estabilidad temporal es una medida del deterioro previsible de los datos con el manejo o, simplemente, con el paso del tiempo. Con los actuales métodos de almacenamiento informático (especialmente los discos ópticos), el deterioro de la información digital es muy bajo, sobre todo si se tiene en cuenta la posibilidad de hacer copias ilimitadas sin la progresiva degradación característica de los mapas convencionales.

La Transportabilidad de los MDT está estrechamente vinculada a los equipos informáticos que los manejan: por un lado, la información sólo es accesible en los locales o instituciones donde estos equipos están ubicados físicamente; por otro, el intercambio de la información entre diversos equipos no está completamente resuelto. En lo referente al primer caso, los equipos no suelen ser transportables por lo que existe una separación entre el trabajo de campo y la integración de la información que puede ser limitante en algunos aspectos. Por otro lado, el intercambio de información depende del formato de almacenamiento de los sistemas informáticos. En este sentido, la tendencia general es hacia la compatibilización (más que la estandarización) y en la actualidad este tipo de problemas suele resolverse con relativa facilidad.

La Actualización de los datos es teóricamente inmediata en los MDT a través de los sistemas informáticos que los manejan. Los cambios en los datos básicos pueden realizarse de una forma directa, y para la reelaboración de los datos derivados basta con ejecutar de nuevo los programas ya elaborados. Este tipo de manejos es, al contrario, muy costoso en los mapas convencionales debido a que la producción de un nuevo documento obliga a la repetición de etapas intermedias menos automatizadas y depende de procesos de artes gráficas de coste económico muy alto.

Algunas posibilidades que ofrecen los MDT, dependientes del tratamiento numérico de los datos, resultan impracticables con los mapas convencionales debido a la naturaleza analógica de los mismos. Entre ellas está la capacidad de obtener estadísticos descriptivos o la creación de nueva información mediante el tratamiento numérico de uno o más modelos precedentes. Un ejemplo de la primera posibilidad es la obtención de la altitud media de una serie de zonas del mapa. La distribución de pendientes en función de la altitud es un ejemplo de la segunda. La obtención de ambos resultados a partir de un mapa convencional exige un laborioso tratamiento manual sujeto a un alto riesgo de error y con baja repetibilidad. En los MDT es

necesaria la realización de programas que realicen esta función (sencillos en este caso particular, aunque la complejidad pueda ser mucho mayor en otros problemas). Una vez hecho este esfuerzo inicial, la amortización es previsiblemente muy rápida si el método es de validez general. Los errores, si el MDT está suficientemente depurado, son inexistentes y la repetibilidad es absoluta.

Finalmente, Felicísimo (1994) describe literalmente que los MDT permiten realizar procesos de simulación del funcionamiento de un sistema dinámico real. Manipulando los datos del MDT o complementándolos con otras descripciones de fenómenos físicos se accede a un medio de investigación de gran potencialidad. El método reside en establecer los principios físicos de fenómenos que dependen más o menos estrechamente de las propiedades del terreno y realizar una simulación numérica a partir de estos principios teóricos. Por este camino pueden elaborarse modelos de previsión de fenómenos de interés y, si se tiene la posibilidad de confrontar los resultados con la realidad, se hace posible el perfeccionamiento del modelo mediante ajustes sucesivos.

En la actualidad los diferentes análisis de la morfología del terreno como herramienta para el análisis de la geología, se encuentra en continuo desarrollo con la introducción de los Modelos Digitales del Terreno (MDT) y sus nexos con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en los que operan (Sánchez, F. et al, 1998).

MARCO METODOLOGICO

La Metodología se centra en técnicas de Percepción Remota y de Integración a un Sistema de Información Geográfica, método que se ha documentado por varios autores entre ellos destacaremos la metodología de Buzai, et al (2013), en la que describe cinco fases (Figura 20): 1) Conceptual; 2) Conceptual Metodológica; 3) Metodológica Técnica; 4) Validación y 5) Transferencia. Esta metodología describe tanto las fases como los diferentes componentes a considerar dentro del proceso de investigación con datos geospaciales con el uso de los sistemas de información geográfica.

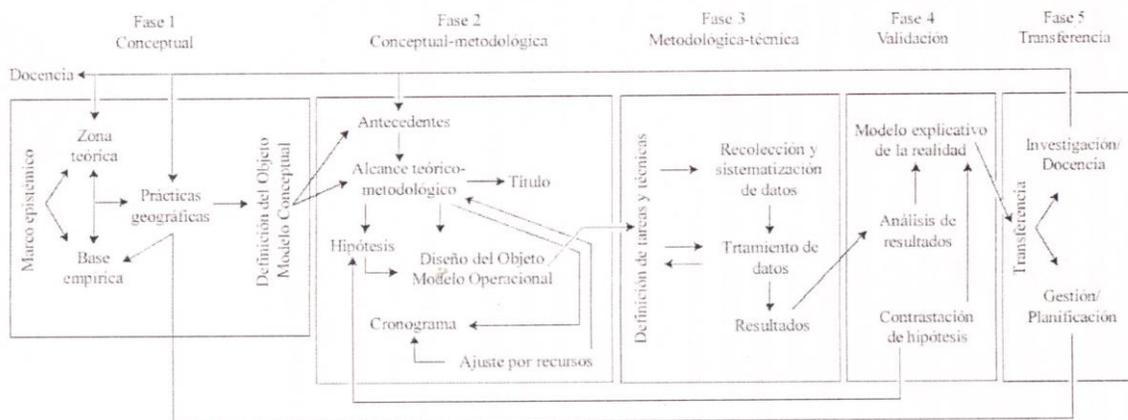


Figura 20. Componentes de un proyecto de investigación en SIG. Buzai, et al (2013).

El presente trabajo adecúa la metodología de investigación de diferentes datos ráster de sensores remotos (Percepción Remota) a los Sistemas de Información Geográfica, en cinco etapas, como se muestra en la Figura 21.

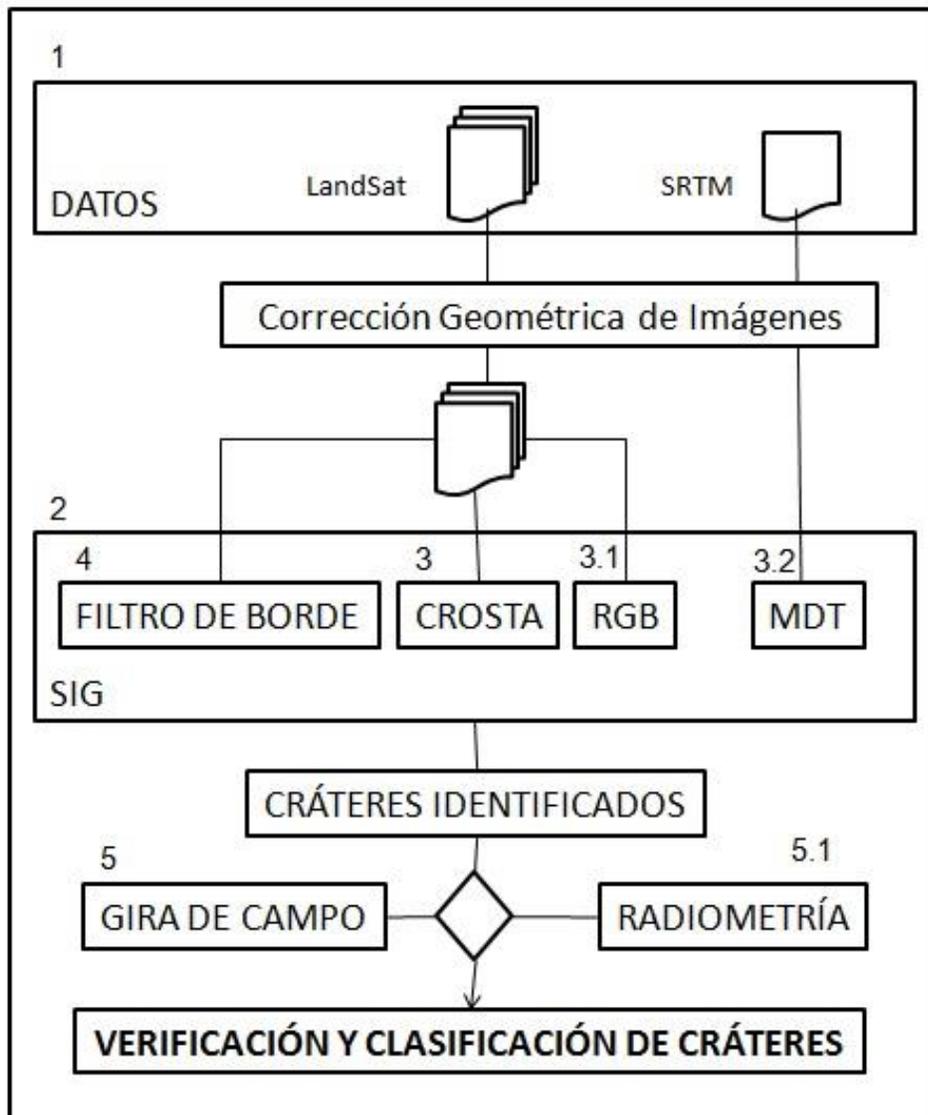


Figura 21. Flujograma de la metodología de la investigación. Elaboración propia.

1. Adquisición de Imagen Satelital

En esta actividad se adquirieron (descarga gratuita de imágenes vía internet del Servicio Geológico de Estados Unidos USGS, a través del visor Glovis) imágenes de diferentes sensores, del Sensor Pasivo LandSat (Escena p18r51, correspondiente a la zona sur de Honduras), y del Sensor Activo SRTM de 1

arco de segundo (Figura 22), con el que se despliega un Modelo Digital de Terreno (MDT).

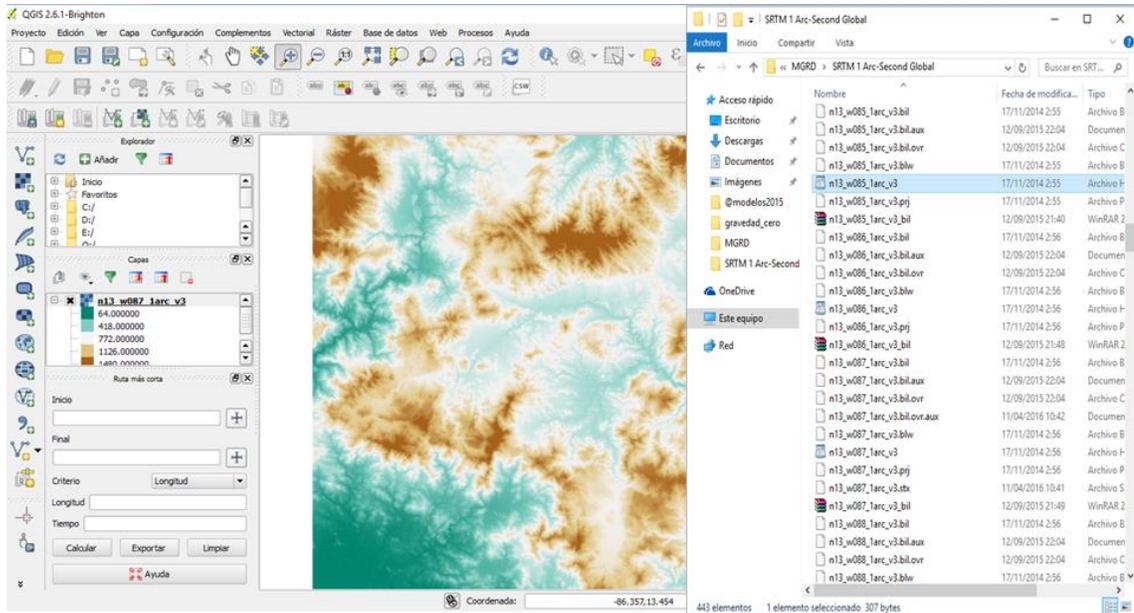


Figura 22. Archivos SRTM de un arco de segundo. Elaboración propia.

A la imagen satelital del sensor LandSat

2. Integración al SIG

Dentro de la estructura de la metodología parte importante se desarrolla una vez que se ha conformado la base de datos que integrará el Sistema de Información Geográfica manejador de datos espaciales, Por lo que para este estudio se utilizaron aplicaciones los softwares corresponden a gvGIS y Q-GIS, (Figura 23). Ambos son Sistemas de Información Geográfica de uso público, con compatibilidad estándar que permitió la transferencia de capas de información de formatos ráster y vector, sin limitaciones para su visualización y divulgación.



Figura 23. Imagen de los Programas de QGIS y gvSIG. Elaboración propia.

3. Aplicación de técnicas ADI

Componentes Principales Orientados (CROSTA), un ACP se debe entender como una combinación lineal por la cual un conjunto de variables correlacionadas se transforma en un sistema de variables no correlacionadas llamadas componentes principales (CP) las cuales pueden describir en un espacio menos complejo la variabilidad total de los datos originales. Esto quiere decir que las transformaciones iniciales de los datos estarán referidas a un nuevo sistema de ejes ortogonales en el cual la varianza en la dirección del primer eje está maximizada.

La varianza total de los componentes es igual a la varianza de las variables originales y los CP se ordenan según varianza decreciente (Delendatti, 2003). En este estudio se aplica para resaltar diferentes materiales minerales, que determinan alteraciones o anomalías en las rocas, con el propósito de contrastar el material de los hallazgos de cráteres de los MDT y de Composición RGB, con posibles anomalías hidrotermales (Figura 24).

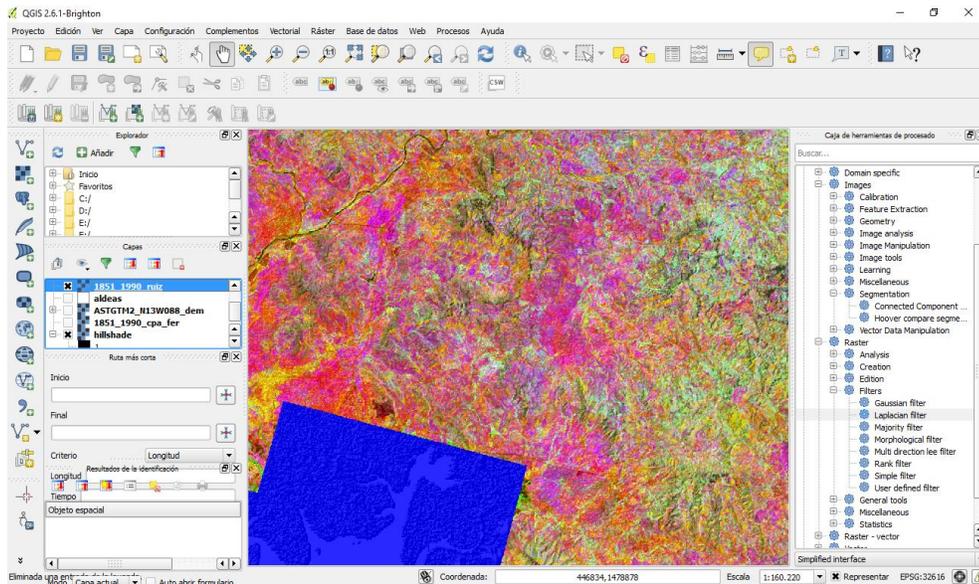


Figura 24. Modelo CROSTA. Elaboración propia.

Según Chuvieco (1990), Las bandas del Thematic Mapper del Proyecto LandSat (TM) son variables correlacionables porque comparten información espectral debido a que los distintos tipos de superficies tienden a presentar comportamientos similares en regiones próximas del espectro electromagnético.

Aplicando ACP a un número n de bandas (las cuales definen un espacio n -dimensional) se generan n componentes principales (CP) o nuevas bandas en las que la información espectral original se reorganiza de forma más sencilla reduciendo al mínimo la redundancia de la información (y por lo tanto la correlación) entre las nuevas bandas sin que esto implique la pérdida de datos ya que la varianza total del sistema permanece constante después de la transformación.

La literatura cita que al correr un ACP, la secuencia de cálculos efectuados son los siguientes: 1) matriz de varianza/covarianza; 2) matriz de correlación

entre bandas originales; 3) matrices de eigenvectores por eigenvalor y 4) matriz de pesos (loadings). Observando las correspondientes matrices se puede ver que todas las variables aportan información a las CP's.

Los eigenvalores expresan la longitud de cada una de las nuevas componentes y permiten ver la distribución de la varianza total del sistema en las nuevas bandas.

La primera CP retiene el mayor porcentaje de información original y las siguientes componentes retienen proporciones cada vez menores. Los eigenvectores representan los pesos sobre cada una de las variables originales en la ecuación para calcular una CP y el signo de los mismos indica el sentido de variación de las nuevas variables en relación con las originales.

Los elementos de la matriz de cargas o loadings miden la correlación de las variables originales con las CP y en el cálculo del peso entre una CP y una banda intervienen el eigenvector de la componente en la banda, el eigenvalor del componente y la desviación típica de la banda (Chuvieco 1990).

Una vez comprendidas las interacciones entre los fluidos hidrotermales formados por variables proporciones de líquidos magmáticos y/o meteóricos con la roca, producen asociaciones de minerales de alteración en la zona de acción; óxidos de hierro, (hematita, goethita y jarosita); así como, materiales arcillosos alterados. Espectralmente cada roca alterada es sensible a un rango específico del espectro electromagnético; los óxidos de hierro son más sensibles a ser detectados en el visible (400 – 700 nm) con máxima reflectancia en la banda roja TM3 y las alteraciones arcillosas presentan reflectancia y absorción en el rango de los infrarrojos de onda corta (SWIR) o bandas TM5 y TM7.

4. **Aplicación de Filtros Espaciales Kernel de Bordes:**

El procesamiento por grupo de píxeles opera sobre un grupo de píxeles de entrada que rodean a un píxel central. Por lo tanto, los píxeles adyacentes proporcionan información importante sobre la tendencia del brillo en el área que se está procesando. El uso y análisis de estas tendencias del brillo en una imagen, motivan las operaciones de filtrado espacial. Todas las imágenes contienen detalles, algunos detalles marcados y otros detalles no tan marcados. Estos detalles están compuestos por transiciones de brillo que varían en ciclos que van del oscuro al claro y vuelta al oscuro. La tasa a la cual el brillo varía completando un ciclo es su frecuencia espacial. Las frecuencias espaciales pueden orientarse horizontalmente, verticalmente o en cualquiera de las diagonales.

Una imagen está formada por componentes de frecuencia que varían de bajas frecuencias a altas frecuencias. Donde prevalecen transiciones rápidas de brillo, hay altas frecuencias espaciales, mientras que transiciones de brillo que cambian lentamente representan bajas frecuencias. Las altas frecuencias en una imagen aparecen toda vez que están presentes bordes abruptos o puntos, como una transición del blanco al negro dentro de uno o dos píxeles de distancia. Una imagen puede filtrarse para acentuar o eliminar una banda de frecuencias espaciales, tales como las altas frecuencias o las bajas frecuencias. Estas operaciones de procesamiento digital de imágenes se conocen como operaciones de filtrado espacial o filtros en el dominio del espacio. Otras operaciones de filtrado espacial permiten resaltar solamente las transiciones abruptas en la imagen, tales como bordes de objetos. Estas constituyen un subconjunto de las operaciones de filtrado espacial y se conocen como operaciones de realce de bordes.

Filtros Espaciales Lineales

Los filtros espaciales se implementan mediante un proceso llamado convolución espacial. Es un método matemático utilizado en procesamiento y análisis de señales, y se conoce también como filtro de respuesta finita al impulso (finite impulse response filter). El proceso de convolución espacial se mueve a través de la imagen de entrada, pixel por pixel, ubicando los pixeles resultantes en la imagen de salida. El valor digital de brillo de cada pixel en la imagen de salida depende de un grupo de pixeles de entrada que rodean al pixel que se está procesando. Al utilizar la información del brillo de los pixeles vecinos a un pixel central, la convolución espacial calcula la actividad de frecuencia espacial en esa área, y por lo tanto, es capaz de filtrar en base al contenido de frecuencia espacial existente. El proceso de convolución espacial utiliza un promedio ponderado del pixel de entrada y de sus vecinos inmediatos para calcular el valor de brillo del pixel de salida. El grupo de pixeles utilizados en el cálculo del promedio ponderado se conoce como núcleo (kernel).

El núcleo es una matriz móvil, generalmente cuadrada, con un número impar de valores en cada dimensión. Si la dimensión del núcleo es 1 x 1 se trata del procesamiento digital punto por punto; las dimensiones usuales en procesamiento por grupo son 3 x 3 y 5 x 5. Cuanto mayor es el tamaño del núcleo de pixeles que se emplea en el cálculo, más grados de libertad posee el filtro espacial. Un cálculo de promedio ponderado es un proceso lineal puesto que involucra la suma de elementos multiplicados por valores constantes. En la convolución espacial los elementos son los valores digitales de brillo de los pixeles del núcleo y los valores constantes son los pesos, llamados coeficientes de convolución. En el caso más simple donde todos los pesos son iguales a 1 / n° de elementos del núcleo, el proceso consiste en un cálculo de promedio convencional, es decir, se promedian los valores de brillo de los pixeles del núcleo. Si los pesos se alteran, algunos pixeles tendrán más o menos influencia

en el promedio general. La elección de estos pesos determina directamente la acción del filtrado espacial, por ejemplo, filtrado de paso alto, filtrado de paso bajo o filtrado para realce de bordes. La mecánica de la convolución espacial consiste en aplicar junto con el núcleo de convolución, los coeficientes de convolución en forma de arreglo o matriz; esta matriz se conoce con el nombre de máscara de convolución. El pixel correspondiente al centro del núcleo y sus vecinos se multiplican por sus respectivos coeficientes de convolución y luego estos valores se suman.

El resultado se ubica en la imagen de salida en la misma posición del pixel central. Este proceso ocurre pixel por pixel, para cada pixel en la imagen de entrada. Dado que el área filtrada se limita a los pixeles centrales, los pixeles de los bordes no se afectan por el proceso puesto que no tienen los vecinos necesarios para realizar el cálculo. Las máscaras de convolución pueden tomar cualquier valor numérico. Sin embargo, cuando se ejecuta el proceso de convolución el valor final resultante debe hallarse entre 0 y 255 (para imagen de salida de 8-bits). Para ello, generalmente suelen reemplazarse por 255 los valores mayores a 255 y por 0 los valores menores a 0. Si se considera un núcleo de pixeles de dimensión 3 x 3 y una máscara de convolución cuyos nueve coeficientes son:

$$\begin{matrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{matrix}$$

Entonces la ecuación para el proceso de convolución espacial resulta:

$$O(x, y) = a I(x - 1, y - 1) + b I(x, y - 1) + c I(x + 1, y - 1) + d I(x - 1, y) + e I(x, y) + f I(x + 1, y) + g I(x - 1, y + 1) + h I(x, y + 1) + i I(x + 1, y + 1)$$

Donde los prefijos I y O indican imagen de entrada e imagen de salida respectivamente (Baxes, 1994).

Filtros de Paso Alto

Este tipo de filtros pretende aislar los componentes de alta frecuencia en una imagen. El filtro de paso alto tiene un efecto opuesto al filtro paso bajo, acentúa los componentes de alta frecuencia espacial mientras que deja sin tocar los componentes de baja frecuencia espacial. Una máscara de paso alto muy común, de dimensión 3 x 3, es aquella que contiene un 9 en la posición del centro y -1 en las posiciones que lo rodean, es decir:

$$\begin{array}{ccc} -1 & -1 & -1 \\ -1 & +9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{array}$$

La suma de los coeficientes es 1 y los coeficientes más pequeños rodean al coeficiente del centro que es positivo y el más grande. Esta disposición de los coeficientes indica que el pixel central del grupo de pixeles de entrada que se procesan aporta una alta influencia, mientras que los pixeles que lo rodean actúan oponiéndose a él. Si el pixel central posee un valor de brillo muy diferente al de sus vecinos inmediatos, entonces el efecto de estos últimos es despreciable y el valor de salida es una versión acentuada del valor original del pixel del centro. Esa diferencia grande indica una marcada transición en los niveles de gris, lo que indica la presencia de componentes de altas frecuencias. Por consiguiente, en la imagen de salida se espera que la transición aparezca acentuada. Por el contrario, si los valores de brillo de los pixeles vecinos son suficientemente grandes para contrarrestar el peso del pixel del centro, entonces el resultado final se basa más en un promedio de los pixeles involucrados.

Si el valor de brillo de todos los pixeles de un núcleo 3 x 3 son iguales, el resultado es simplemente el mismo valor. Es decir, produce la misma respuesta que el filtro de paso bajo aplicado sobre regiones constantes. Esto significa que el filtro de paso alto no atenúa los componentes de bajas frecuencias

espaciales. Más precisamente enfatiza los componentes de altas frecuencias mientras que deja sin tocar los de bajas frecuencias. Los filtros de paso alto permiten destacar cualquier rasgo fronterizo de una imagen, independientemente de su orientación. Los filtros de paso bajo y paso alto constituyen la base de la mayor parte de las operaciones de filtrado espacial. Estos filtros proveen la parte adaptativa de la operación de procesamiento puntual conocida como umbral adaptativo (adaptive thresholding).

Realce y Detección de Bordes

El realce de bordes transforma una imagen de manera que exhibe sólo el detalle de bordes o fronteras. Los bordes aparecen como las líneas de contorno de los objetos dentro de la imagen. Estos contornos pueden utilizarse en posteriores operaciones de análisis de imágenes para el reconocimiento de objetos o rasgos. Los realces de bordes son implementados a través de filtros espaciales. Los más utilizados son: desplazamiento y sustracción, filtros Laplacianos para bordes, gradiente de Prewitt, Roberts, Sobel y Kirsch.

El método de desplazamiento y sustracción o resta permite realzar información de bordes verticales u horizontales. Desplazando una imagen a la izquierda en un pixel y restando esta nueva imagen de la original, se resaltarán los bordes verticales. Esto se debe a que el valor de brillo de cada pixel de entrada es restado de su vecino horizontal, dando un valor de la diferencia de brillo entre ambos, conocida como pendiente en el contexto de una imagen. Si dos pixeles adyacentes tienen brillos muy diferentes (existencia de borde), la diferencia resultará grande. Por el contrario, si dos pixeles adyacentes tienen valores similares de brillo (no existencia de borde), la diferencia de brillos resultante será pequeña. El efecto es una imagen donde aparecen los contornos direccionales. Análogamente, el realce de borde horizontal se implementa desplazando la imagen un pixel hacia arriba y restando. La operación de

desplazamiento y sustracción se lleva a cabo utilizando las siguientes máscaras:

$$\begin{array}{ccc}
 0 & 0 & 0 \\
 -1 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 \\
 \text{vertical}
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ccc}
 0 & -1 & 0 \\
 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 \\
 \text{horizontal}
 \end{array}$$

La suma de los coeficientes es igual a 0. Esto significa que a medida que la máscara pasa sobre regiones de la imagen con valores de brillo constantes (no bordes), el resultado que se produce es 0, lo que representa una pendiente de brillo igual a 0 (Baxes, 1994). La operación del gradiente de Prewitt determina un realce de borde direccional. Si se utiliza un núcleo de dimensión 3 x 3, pueden generarse ocho imágenes de gradientes a partir de una imagen original. Cada una resalta los bordes orientados en una de las siguientes ocho direcciones: norte, sur, este, oeste, sureste, noroeste, suroeste y noreste. Las máscaras de convolución correspondientes son (Chuvienco, 1996):

$$\begin{array}{ccc}
 1 & 1 & 1 \\
 1 & -2 & 1 \\
 -1 & -1 & -1 \\
 \text{norte}
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ccc}
 -1 & -1 & -1 \\
 1 & -2 & 1 \\
 1 & 1 & 1 \\
 \text{sur}
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ccc}
 -1 & 1 & 1 \\
 -1 & -2 & 1 \\
 -1 & 1 & 1 \\
 \text{este}
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ccc}
 1 & 1 & -1 \\
 1 & -2 & -1 \\
 1 & 1 & -1 \\
 \text{oeste}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc}
 -1 & -1 & 1 \\
 -1 & -2 & 1 \\
 1 & 1 & 1 \\
 \text{sureste}
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ccc}
 1 & 1 & 1 \\
 1 & -2 & -1 \\
 1 & -1 & -1 \\
 \text{noroeste}
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ccc}
 1 & -1 & -1 \\
 1 & -2 & -1 \\
 1 & 1 & 1 \\
 \text{suroeste}
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ccc}
 1 & 1 & 1 \\
 -1 & -2 & 1 \\
 -1 & -1 & 1 \\
 \text{noreste}
 \end{array}$$

La suma de los coeficientes es igual a 0. Tal como en el filtro tratado anteriormente, a medida que la máscara pasa sobre regiones de la imagen con valores de brillo constantes, el resultado es 0, indicando pendiente de brillo igual a 0. En aquellas regiones donde el gradiente de Prewitt genera resultados negativos, el valor de salida se establece igual a 0 porque brillos negativos no están definidos. La imagen de gradiente aparece como negra toda las veces

que los valores de brillo sean constantes. Aquellos bordes con la orientación direccional correcta en la imagen original, aparecen como blancos en la imagen de gradiente. El realce de borde Laplaciano es una operación omnidireccional que resalta todos los bordes en una imagen, independientemente de sus orientaciones. Esta operación está basada en la tasa de cambio de la pendiente del brillo dentro de un núcleo de píxeles de dimensión 3 x 3. La máscara Laplaciana más común está formada por un 8 en la posición central y -1 en las posiciones que la rodean.

$$\begin{array}{ccc} -1 & -1 & -1 \\ -1 & +8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{array}$$

Los coeficientes suman 0 y como en el caso de una máscara de filtro de paso alto, coeficientes con valores negativos rodean al coeficiente del centro que es un valor positivo grande. La operación de realce Laplaciano genera picos más marcados o abruptos en los bordes que la operación de gradiente. Cualquier pendiente de brillo, ya sea positiva o negativa, es acentuada, dando al Laplaciano su carácter omnidireccional. En una región de una imagen que es uniforme en brillo o con gradiente de brillo uniforme, el resultado de aplicar la máscara anterior es reducir el nivel de gris a 0. Cuando una discontinuidad está presente dentro de una vecindad en forma de punto, línea o borde, el resultado del Laplaciano es un valor no nulo, negativo o positivo dependiendo de donde se encuentre el punto central con respecto al borde. A fin de exhibir el resultado cuando surgen valores de píxeles tanto positivos como negativos, es común sumar un valor medio de gris (128 para el caso de imágenes con 1 sólo bit por píxel con valores de gris en el rango de 0 a 255) de modo que los puntos con valor 0 son gris medio, y los valores brillantes y oscuros producidos por el Laplaciano puedan visualizarse. El filtro Laplaciano no es la mejor herramienta para demarcar bordes. En muchos casos, fronteras o bordes aparecen, al menos localmente, como en escalón de brillos dispersos sobre varios píxeles. El Laplaciano da una mejor respuesta a una línea que a un escalón y a un punto

que a una línea. En una imagen que contiene ruido, que se presenta de manera típica como puntos que varían en brillo, el Laplaciano mostrará tales puntos más fuertemente que los bordes o fronteras de interés. A efectos de resaltar aún más puntos, líneas y bordes se puede cambiar el coeficiente del centro de la máscara por +9 (Russ, 1998), resultando precisamente la máscara mencionada en filtros de paso alto. Otro enfoque para localización de bordes utiliza el cálculo de derivada primera (Richards, 1995). Si la imagen es una función continua del brillo en un par de coordenadas continuas x e y , es decir $\Phi(x,y)$, entonces el vector gradiente se define en la imagen como:

$$\nabla\Phi(x, y) = \frac{\partial}{\partial x}\Phi(x, y)\mathbf{i} + \left(\frac{\partial}{\partial y}\right)\Phi(x, y)\mathbf{j}$$

donde \mathbf{i} , \mathbf{j} forman un par de vectores unitarios. La dirección del vector gradiente es la dirección de máxima pendiente ascendente y su amplitud es el valor de pendiente. Para operaciones de detección de bordes se utiliza, generalmente, sólo la magnitud del gradiente definido por:

$$|\nabla| = \sqrt{\nabla_1^2 + \nabla_2^2}$$

$$\text{donde } \nabla_1 = \frac{\partial}{\partial x}\Phi(x, y) \quad \text{y} \quad \nabla_2 = \frac{\partial}{\partial y}\Phi(x, y)$$

Algunas imágenes son esencialmente unidimensionales, por lo tanto la aplicación de la derivada primera a tales imágenes, en la dirección de variación más importante demarca las fronteras y realza la visibilidad de pequeños escalones y otros detalles. A continuación figuran las máscaras más comunes para la detección de bordes en distintas direcciones:

$$\begin{array}{ccc}
 +1 & 0 & -1 & +1 & 0 & -1 & +1 & -1 & -1 \\
 +1 & 0 & -1 & +2 & 0 & -2 & +2 & +1 & -1 \\
 +1 & 0 & -1 & +1 & 0 & -1 & +1 & -1 & -1 \\
 \\
 +1 & +1 & 0 & -2 & +1 & 0 & +2 & +1 & -1 \\
 +1 & 0 & -1 & +1 & 0 & -1 & +1 & +1 & -1 \\
 0 & -1 & -1 & 0 & -1 & -2 & -1 & -1 & -1 \\
 \\
 +1 & +1 & +1 & +1 & +2 & +1 & +1 & +2 & +1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & +1 & -1 \\
 -1 & -1 & -1 & -1 & -2 & -1 & -1 & -1 & -1
 \end{array}$$

y de manera similar se construyen las restantes para obtener las ocho rotaciones (Russ, 1998). Para datos de imágenes digitales, no es posible calcular la derivada continua. En su lugar, puede calcularse, en el caso unidireccional, el valor de la diferencia entre dos píxeles adyacentes como derivada finita (se hizo mención en el método de desplazamiento y sustracción). Es posible extender los mismos principios relativos a la derivada primera unidireccional, para localizar fronteras con orientaciones arbitrarias en imágenes bidimensionales. Esta constituye una de las operaciones más comunes entre todas las operaciones de realce de imágenes.

Tal como en el caso unidireccional, en orientaciones arbitrarias las derivadas continuas (1) en datos de imágenes digitales son reemplazadas por diferencias pero en este caso con 2 diferencias de píxeles que representan una aproximación finita a las derivadas del brillo. El operador de Sobel es una de las técnicas más comúnmente utilizadas y es equivalente a la aplicación simultánea de las siguientes máscaras:

$$\nabla_1 = \begin{array}{ccc} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{array} \quad \nabla_2 = \begin{array}{ccc} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{array}$$

El operador de Kirsch aplica cada una de las ocho orientaciones de una máscara direccional y retiene el valor máximo. Se obtienen resultados similares a Sobel en la detección de bordes.

Filtros Espaciales no Lineales

Existen otros filtros espaciales que no son función lineal de los valores de brillo de los píxeles de una imagen. Es decir, no se calculan como una suma lineal de elementos (brillo de los píxeles) multiplicados por pesos constantes (coeficientes de la máscara). Estos filtros se conocen como filtros espaciales no lineales. Constituyen también técnicas de procesamiento por grupo de píxeles, operando sobre un núcleo de píxeles de entrada que rodean a un píxel central. La diferencia es que en lugar de utilizar un promedio ponderado, emplean otras técnicas que combinan los valores de brillo del grupo de píxeles de entrada. Un ejemplo de este tipo de filtros es el filtro de la mediana (Baxes, 1994, Richards, 1995). Se basa en sustituir el valor de brillo del píxel central del núcleo por la mediana de todos los valores de brillo de los píxeles que forman dicho núcleo. Se emplea para eliminar valores anómalos aislados, producto de ruidos aleatorios en la adquisición de los datos. Otro filtro espacial no lineal es el filtro de la moda. Se basa en sustituir el valor de brillo del píxel central del núcleo por la moda (valor de brillo que más se repite) de todos los valores de brillo de los píxeles que forman dicho núcleo.

5. **Giras de Campo:**

Esta actividad permitió al utilizar un espectro radiómetro ASD Pro (Figura 25.A) de 700 canales en el rango del visible al infrarrojo cercano (VIS-IRC), calibrar la imagen Landsat p18r51, comprobar a través de la recolección de firmas espectrales los diferentes materiales mineralógicos presentes en las áreas identificadas como posibles cráteres (Figura 25.B).



Figura 25. Gira y radiometría de campo ASD. Elaboración propia.

6. Análisis de datos

En esta actividad se realizó el cruce de información entre los datos radiométricos de los sitios identificados como cicatrices de cráteres no muy evidentes a simple vista in situ ni en medios satelitales normales y los Modelos Digitales del Terreno (MDT) derivado del SRTM, una vez se identificaran los diferentes sitios potenciales, estos fueron comparados con cráteres de volcanes evidentes, para tal hecho fueron comparados sus materiales rocosos con los de un edificio volcánico activo, particularmente en la vecina República de Nicaragua, en el departamento de Chinandega: Volcán San Cristóbal (Figura 26), el cual se encuentra dentro de la Reserva Natural San Cristóbal-Casita, y el material proveniente de los sitios establecidos como cicatrices de cráteres en el área del Golfo de Fonseca hondureño en los departamentos de Valle y Choluteca.



Figura 26. Volcán San Cristóbal, Chinandega, Nicaragua. Elaboración propia.

RESULTADOS

En la sección de resultados se muestran los productos de cada paso realizado según la metodología propuesta para la identificación de cráteres a través de la aplicación de la teledetección o percepción remota.

Corrección de Imagen

Este es el segmento de una imagen completa del sensor Landsat Thematic Mapper (TM5), correspondiente a la Fila 18 y Columna 51, para el año de 1990, correspondiente a la estación seca. Esta imagen contiene 7 bandas espectrales del rango del visible (Azul, Verde y Rojo) e infrarrojos (Infrarrojo cercano y medio). Como primer producto, tenemos la obtención de una imagen libre de partículas atmosféricas, que pudieran generar ruido por el humo, o gases propios de las diferentes capas o estratos atmosféricos, la cual se logró con la aplicación de una corrección radiométrica a tope de atmosfera (Figura 27), como resultado se obtuvo una nueva imagen (Figura 29) pasando de visualizarse más brillante y con poco contraste, a otra imagen sin brillo, la cual se utilizó para la identificación de cráteres.

$$\left(\rho_{\lambda} = \frac{\rho_{\lambda}'}{\cos(\theta_{SZ})} = \frac{\rho_{\lambda}'}{\sin(\theta_{SE})} \right)^{\text{I}}$$

$$\left(\rho_{\lambda}' = \frac{(M_{\rho} * Q_{cal} + A_{\rho})}{\sin(\theta_{se})} \right)^{\text{II}}$$

ρ_{λ} = Reflectancia planetaria TOA, con corrección por ángulo solar
 θ_{se} = Angulo de elevación solar
 θ_{sz} = Angulo solar cenital local
 $\theta_{sz} = 90^{\circ} - \theta_{se}$

ρ_{λ}' = Reflectancia planetaria TOA, con corrección por ángulo solar
 M_{ρ} = Factor multiplicativo de escalado específico por banda
 A_{ρ} = Factor aditivo de escalado específico por banda
 $\sin \theta_{se}$ = Angulo de elevación solar del centro de la escena
 Q_{cal} = Número digital o cuantificación y calibración para valores de pixel por banda

Figura 27. ^(I) Ecuación de conversión a reflectancia TOA con corrección angular, ^(II) Ecuación derivada para LandSat OLI. (Modificado de IGAC, 2013).

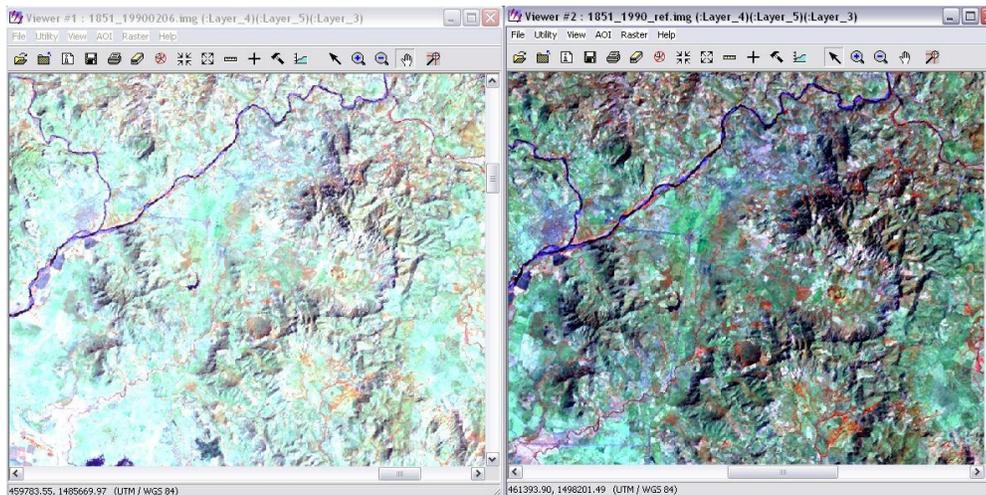


Figura 28. Imagen p18r51 del sensor LandSat TM, con corrección atmosférica.

Elaboración propia.

Filtros Espaciales

En esta actividad se prepararon diferentes operaciones de matrices para destacar lineamientos y bordes de posibles estructuras geológicas. Para ello se utilizó la herramienta de procesamiento de QGIS, correspondiente a Filtros de Paso Alto como el Laplaciano (Figura 29).

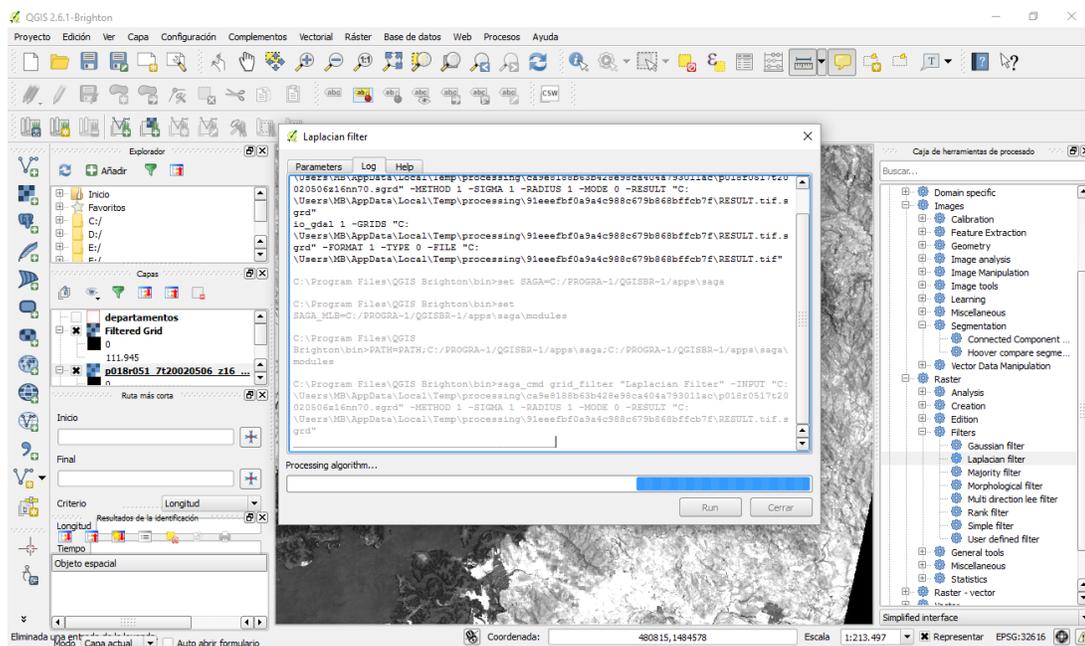


Figura 29. Aplicación de Filtro Laplaciano en QGIS. Elaboración propia.

El filtro Laplaciano aplicado a la imagen mostró una geomorfología muy clara para identificar y resaltar un aparato volcánico abierto con un cráter de dimensiones regulares (de 2 a 3 kilómetros de diámetro), en este caso el cráter del Volcán Cosiguina, del Golfo de Fonseca (Figura 30), pero de la República de Nicaragua, visible a simple vista en la imagen de satélite sin tratamiento y a simple vista in situ, pero no lo suficiente fuerte para resaltar evidencias o vestigios de actividad volcánica en la zona de estudio, ya que en el territorio donde se desarrolló la investigación, por lo que inicialmente solo es apto para los cráteres ya conocidos en la imagen, indicando que si queremos encontrar cicatrices de actividad volcánica, será casi nulo hacerlo solo aplicando filtros de borde, como es el caso del filtro Laplaciano, el cual resulto negativo para detectar cicatrices de cráteres alteradas por la meteorización y actividad humana, tal como se muestra en la Figura 31.

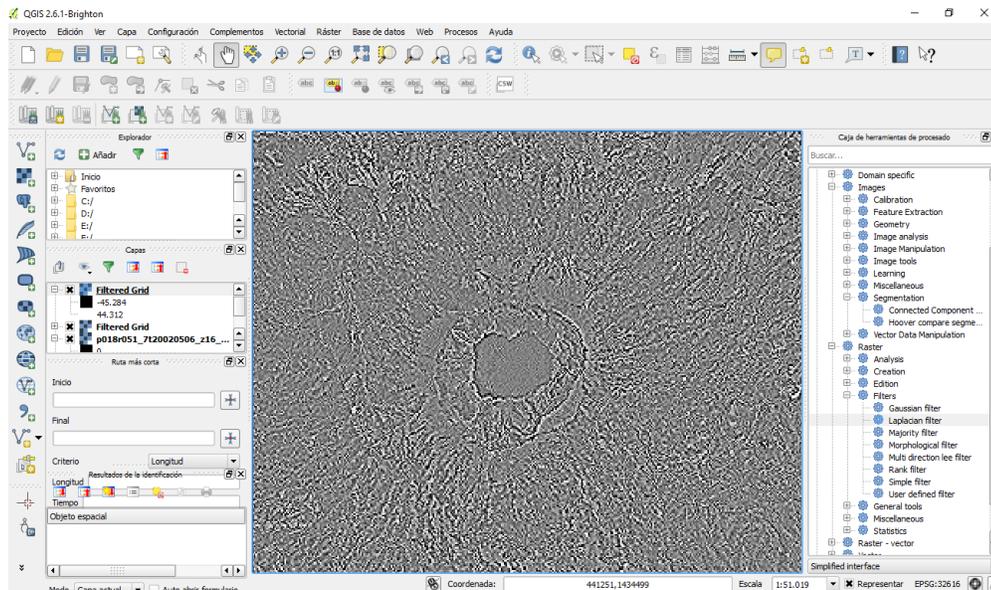


Figura 30. Imagen filtrada para bordes y lineamientos, característica de cráteres.

Elaboración propia.

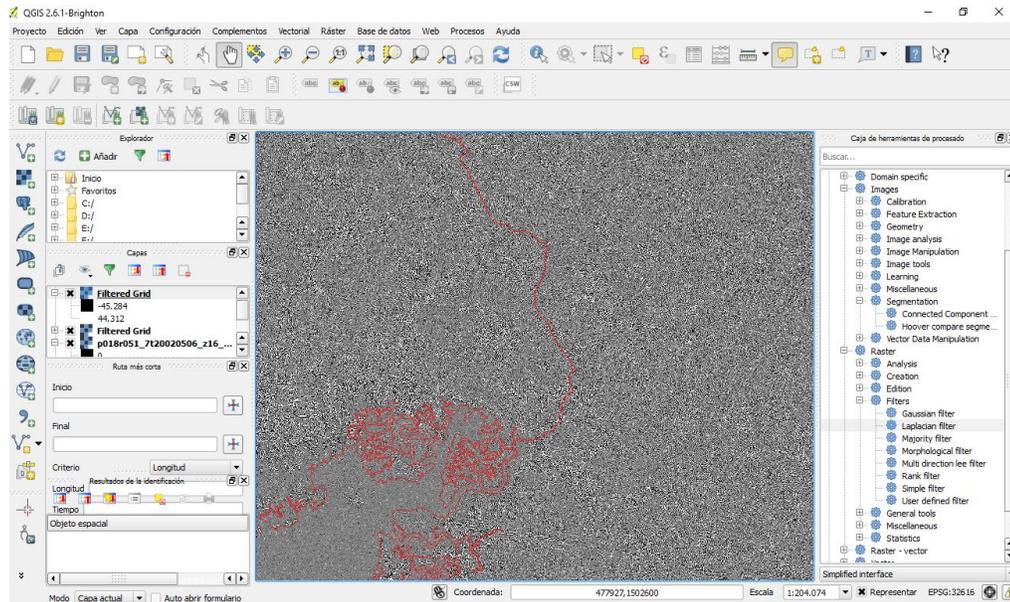


Figura 31. Imagen filtrada para bordes y lineamiento, sin resultados positivos para cicatrices de cráteres volcánicos. Elaboración propia.

Composición de falso color

Combinar bandas en falso color, aplicada para visualizar elementos característicos de rocas y suelos, y materiales afines a restos volcánicos (Cuadro 3), , permitió identificar las áreas potenciales a ser parte cicatrices de cráteres volcánicos que un día formaran parte un aparato volcánico, procedente del Cinturón de Fuego del Pacífico Centroamericano, aunque estos se encuentren muy degradados.

Cuadro 3. Bandas espectrales LandSat y su sensibilidad rocosa. Corrales R. & J. G. Rejas, 2012.

Banda TM5	Centroide de Banda (micras)	Reflecta	Absorbe	Tipo de Material
1	0.4863	B5	B7	Carbonatos
2	0.5706			Filosilicatos
3	06607			Sulfatos
4	0.3882	B3	B2	Hemetita
5	1.6770	B2,B3	B1	Goethita
7	2.2230	B1, B2, B3	B1	Jerosita

Se llama combinación en falso color porque se utilizaron rangos del espectro electromagnético fuera del rango visible, compuesto por luz rojo, verde y azul (RGB, por sus siglas en inglés), con bandas del infrarrojo cercano, medio y lejano o térmico, resaltando elementos del suelo rocosa. R=5, G=3, B=1. Figura 32.

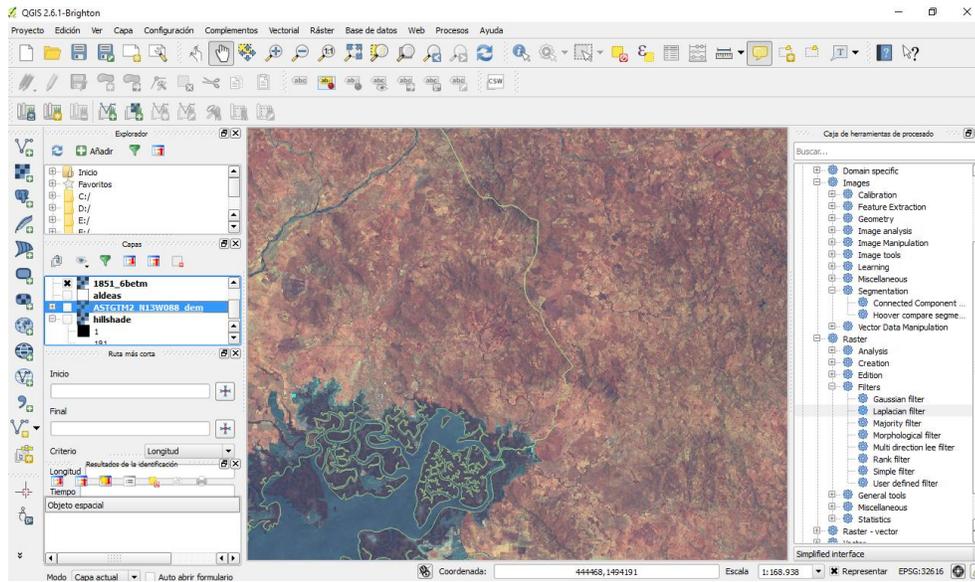


Figura 32. Imagen LandSat en combinación de falso color R=5, G=3, B=1.

Elaboración propia.

Esta combinación correspondiente al rango de infrarrojo medio, rojo y azul, muestra la cobertura de cuerpos de agua en tonos azules, la vegetación en tonos marrones, mientras que los diferentes tonos de suelos en colores pardos, dependiendo su intensidad de la presencia de escasa vegetación o suelos desnudos.

En este caso, la acumulación de la vegetación se convirtió en un patrón de la antigua cresta o corona de lo que alguna vez fue un cráter volcánico, que fue comprobado con la integración del Modelo Digital del Terreno o MDT, derivado del archivo ráster SRTM de ASTER, de un segundo de arco, que tiene una resolución espacial compatible con las imágenes del sensor LandSat de 30 metros. Misma que al cargar ambas imágenes y colocar en transparencia una de ellas observamos la topografía del terreno, como se puede apreciar en la Figura 33.

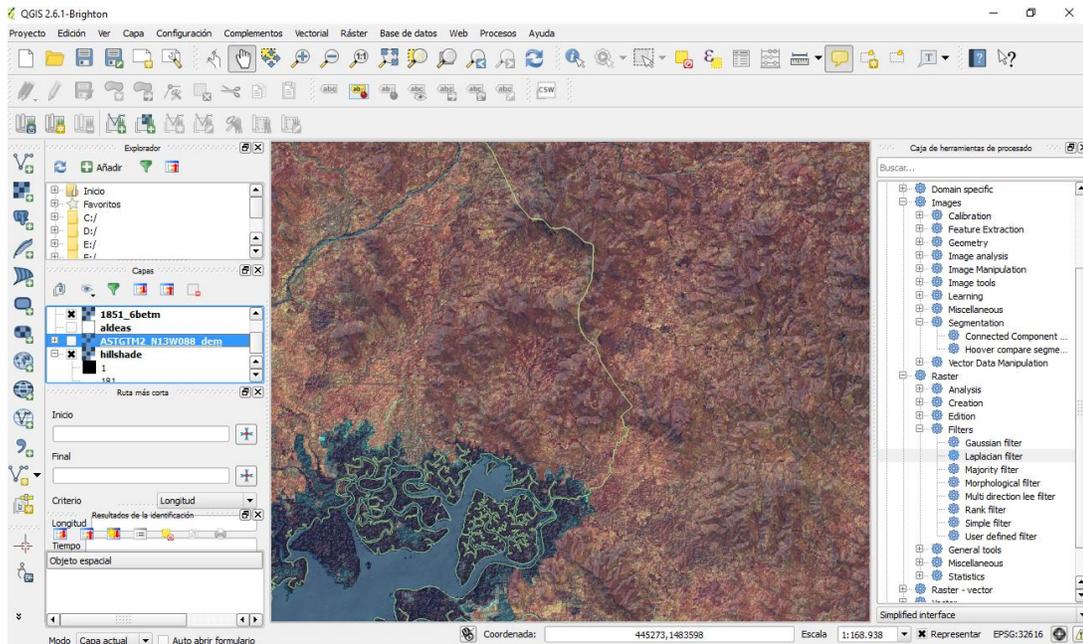


Figura 33. Imagen LandSat en transparencia con una base MDT derivada del SRTM. Elaboración propia.

Modelo Digital del Terreno

El Modelo Digital del Terreno MDT, también llamado DEM del inglés Digital Elevation Model, al MDT se le aplicó la perspectiva de orientación e inclinación solar, para producir de esta manera un modelo de sombras, a través del algoritmo conocido como Hillshade.

El Hillshade calculado mostró la evidencia de formaciones circulares en depresión en las áreas cercanas al Golfo de Fonseca, donde en la actualidad se está practicando agricultura o pastoreo, además de pequeños asentamientos humanos, siendo tres las cicatrices de cráteres encontrados y la sospecha de un cuarto cráter que se encuentra directamente en el estero de San Lorenzo, del departamento de Valle (Figura 34)

Para efectos de ubicar geográficamente a cada uno de las tres cicatrices de cráteres, a continuación se presenta el Cuadro 4, donde aparecen en color rojo las coordenadas de un cuarto posible cráter.

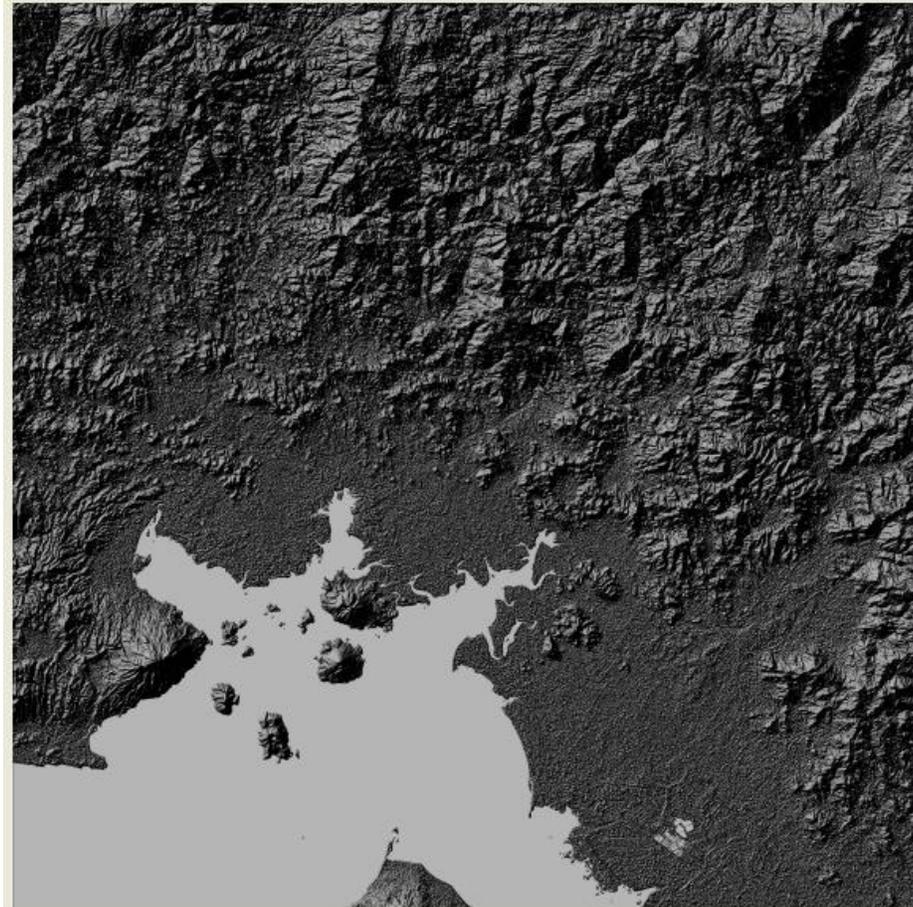


Figura 34. Modelo Digital del Terreno del área del Golfo de Fonseca.

Cuadro 4. Coordenadas Geográficas y Proyectadas en UTM de los cráteres. Elaboración propia.

Cráter	Coordenada Geográfica angular		Coordenada Geográfica plana	
	Latitud Norte	Longitud Oeste	Este	Norte
1	13.51122	- 87.38329	458521	1493703
2	13.46749	- 87.39861	456857	1488869
3	13.41993	- 87.34179	462998	1483600

Los tres sitios (Figura 35), se encuentran alineados en secuencia y orientados en sentido Noreste con las diferentes formaciones cónicas volcánicas del Golfo de Fonseca Hondureño, la isla de Zacate Grande e Isla del Tigre, ubicándose en la planicie, pero con mucho desgaste de las crestas de las coronas de los cráteres, siendo uno de ellos el único que presenta restos de la pluma de lava hoy descubierta (Figura 36).

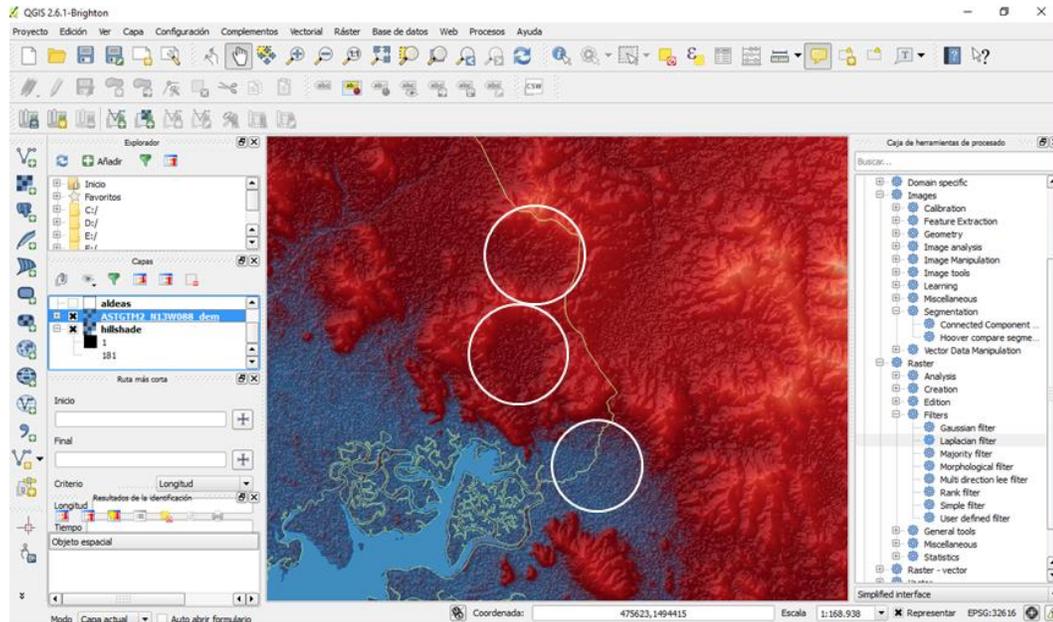


Figura 35. Identificación de las cicatrices de cráteres entre los departamentos de Valle y Choluteca. Elaboración propia.



Figura 36. Cono central del Cráter Norte, de la zona de estudio.

Imagen de Alteraciones Hidrotermales del Área de Estudio

Se calculó en la imagen el ACP por CROSTA (Figura 37) para anomalías hidrotermales, la cual destaca y determina la presencia de materiales no consistentes a los patrones normales de las rocas de la capa superficial del suelo, producto de materiales hidroxilos y óxidos de hierro, los que se asocian a áreas con actividad físico química cambiantes por patrones de cambios térmicos del subsuelo, la mayoría debido a niveles freáticos con temperaturas altas.

Cabe destacar que la zona es conocida por la presencia de aguas termales en pequeños focos, los que dieron en algunos casos la toponimia característica de la zona y que siempre debe tomarse en cuenta debido a los aspectos culturales asociados a los fenómenos volcánicos.

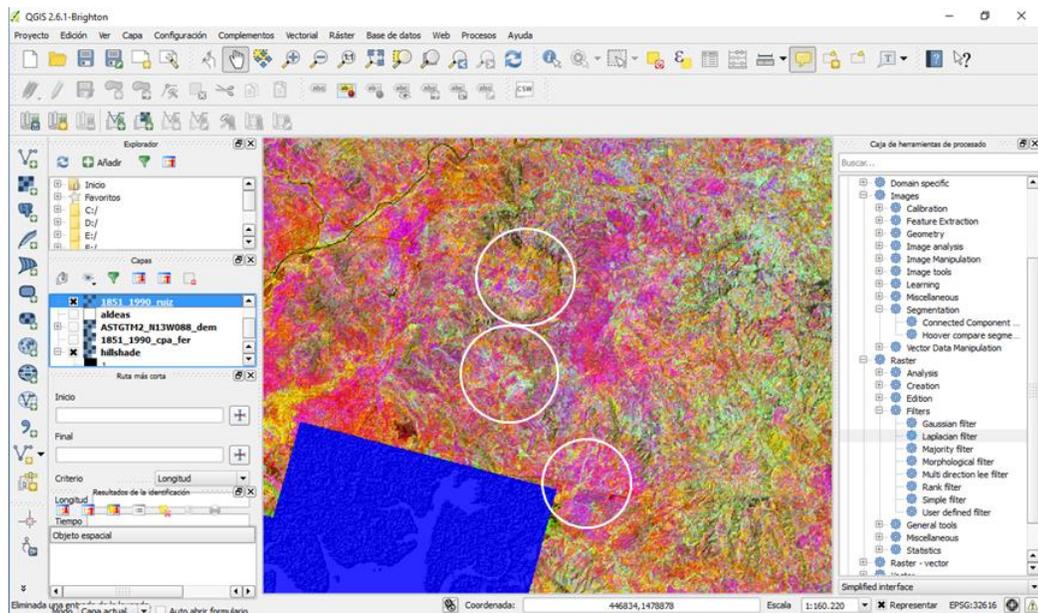


Figura 37. Imagen de alteraciones hidrotermales del sur de Honduras.

De igual manera se compararon diferentes imágenes de cálculos de alteraciones hidrotermales de estudios previos (Figura 38), para comparar la composición de colores que resaltan los diferentes materiales asociados por un lado a la

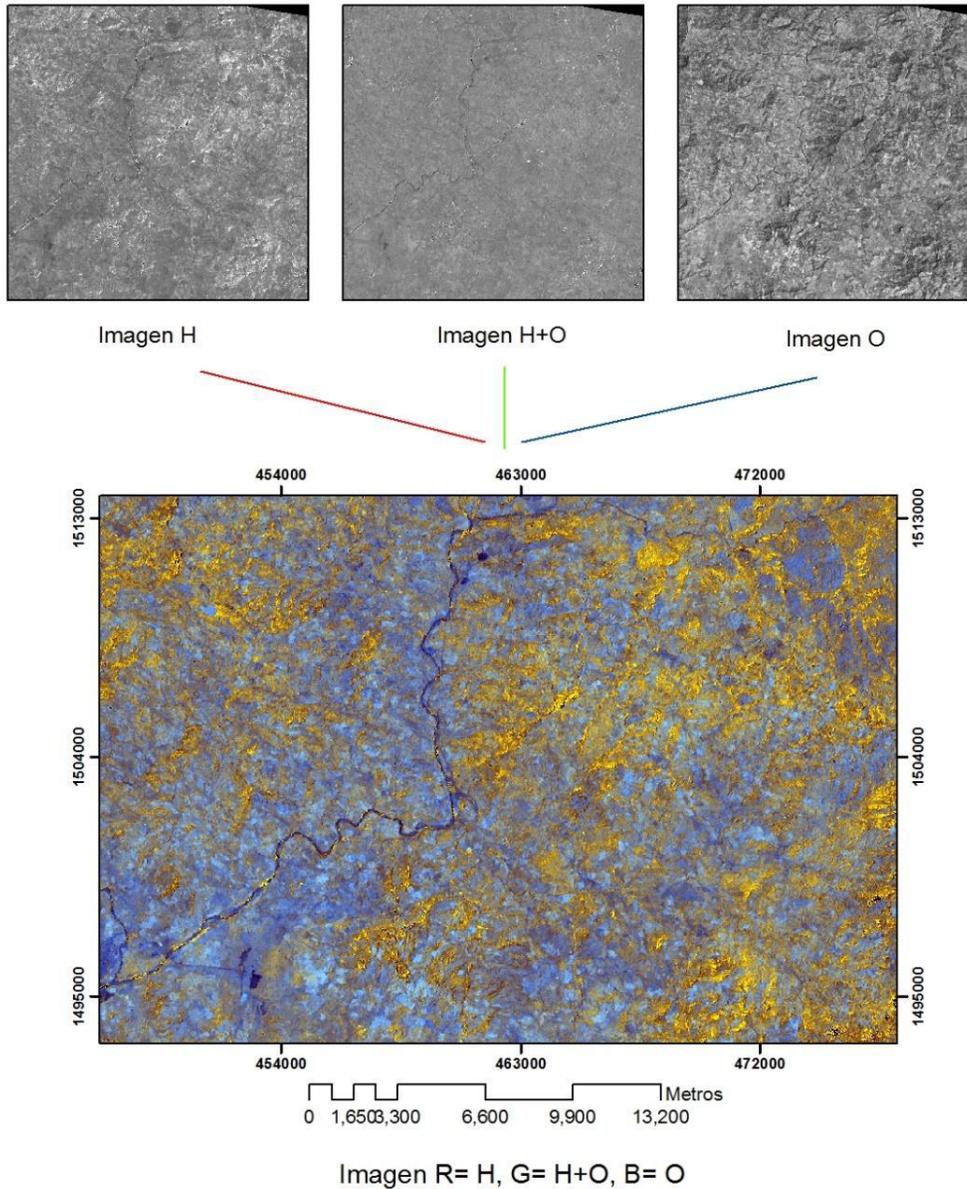
sensibilidad de las bandas espectrales del sensor entre las de los rangos del visible para los Óxidos y las bandas espectrales de los rangos del infrarrojo medio para los Hidroxilos, así como de los diferentes componentes dirigidos (método CROSTA) usando seis (6) y cuatro (4) bandas espectrales siempre del sensor LandSat, (Figura 39).

Gira de Campo

Se llevó a cabo una gira de campo, para la identificación in situ de las diferentes formaciones geomorfológicas, así como recolección de material rocoso del área en cuestión, para ser analizadas posteriormente en el laboratorio de radiometría del Departamento de Ciencia y Tecnologías de la Información Geográfica, ubicado en la Facultad de Ciencias Espaciales de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras. Entre el equipo que conformó la gira de campo se contó con el acompañamiento del Dr. Juan Gregorio Rejas Ayuga, del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, España (INTA), y Tutor de la investigación, quien colaboró en la toma de muestras en las zonas propuestas como cráteres. Así mismo, en la toma de firmas espectrales de coberturas del suelo, para uso de calibración de la imagen de satélite del sensor LandSat (ver Figura 40).

También se realizó una visita a un volcán activo como fumarola, el volcán San Cristóbal en Chinandega, Nicaragua, a donde nos desplazamos para tomar muestras a diferentes alturas y estratos y correlacionarlo con las muestras de los sitios propuestos como cicatrices de cráteres en la zona sur de Honduras.

Mapa de Alteraciones Hidrotermales Valle de Choluteca



La imagen de Hidroxilos (H) se calculo a través del cociente de las bandas 5/7, La imagen de Oxidos (O) se calculo con el cociente entre las bandas 3/1, para representar la imagen en color se sumaron las imagenes H y O, la combinación de bandas se represento como RGB, en imagen H, H+O y O, respectivamente.

Figura 38. Alteraciones Hidrotermales por por Cocientes.

Mapa de Alteraciones Hidrotermales, Método Crosta 6 Bandas y de 4 Bandas para Hidroxilos y Óxidos de Hierro

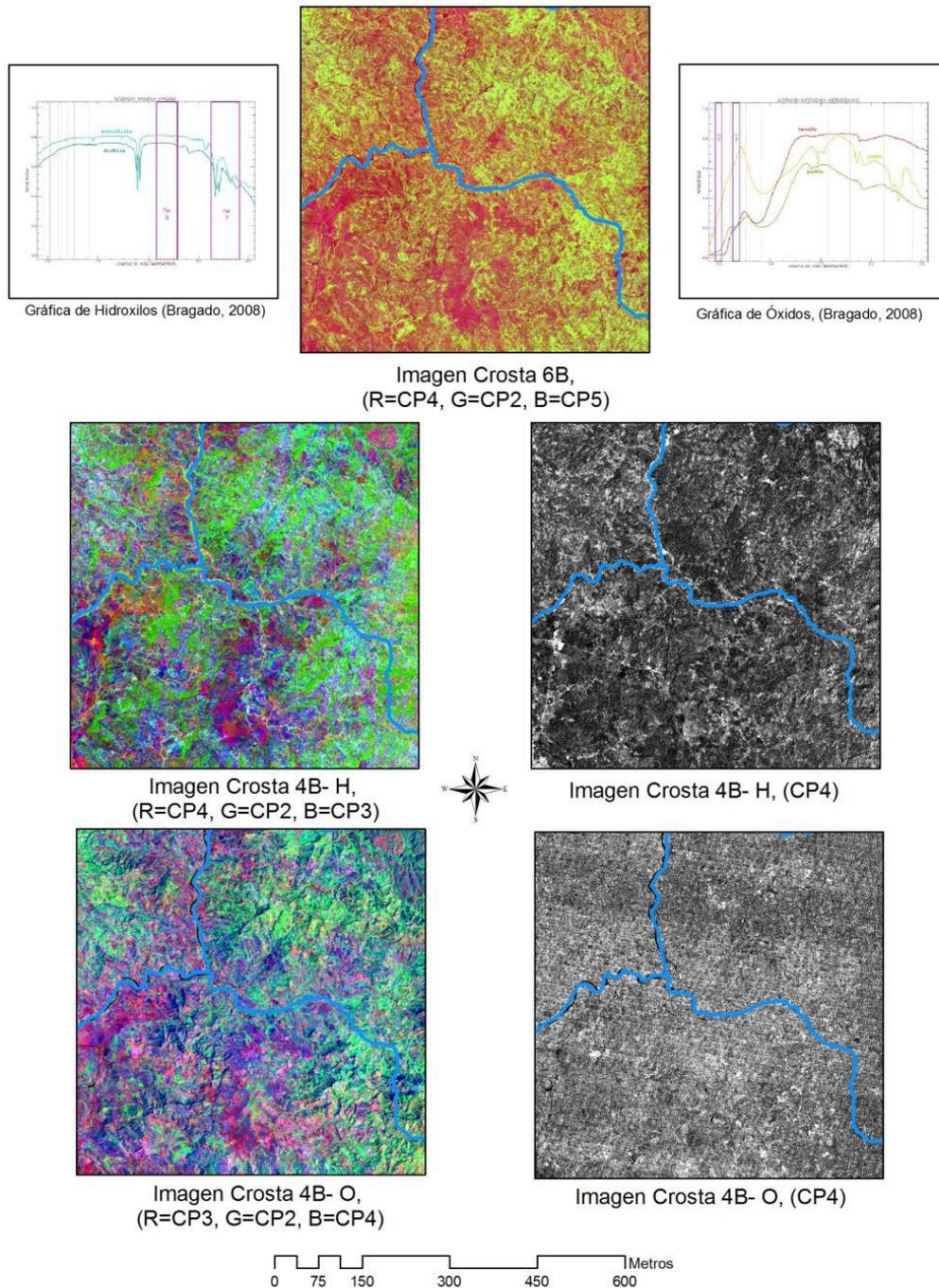


Figura 39. Alteraciones Hidrotermales, Método Crosta de 6 y 4 Bandas.

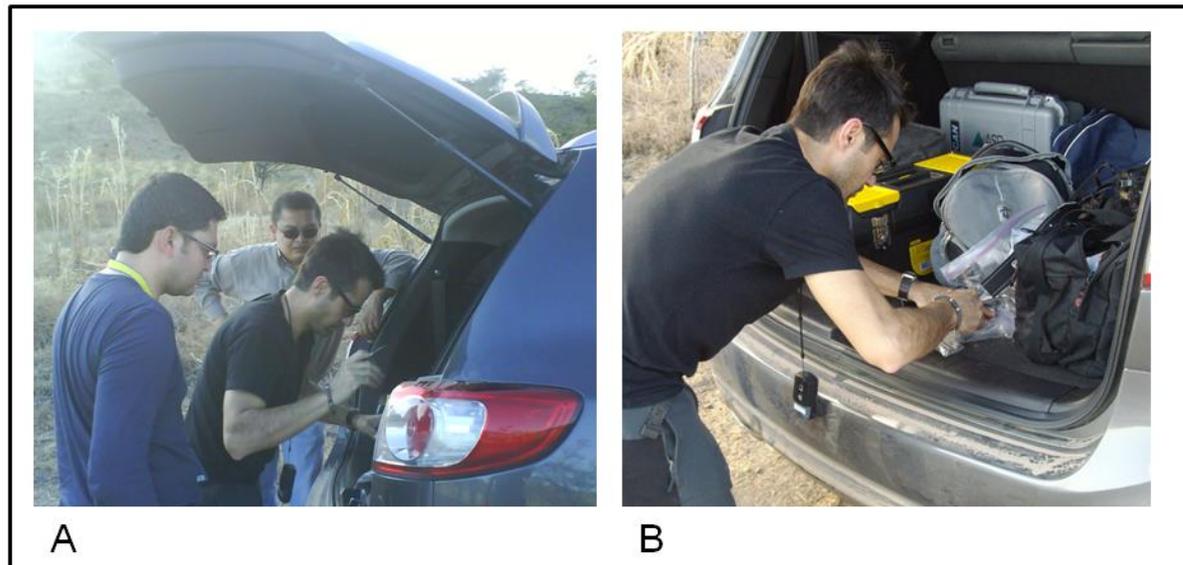


Figura 40. Registro de muestras de suelo de las zonas propuestas como cicatrices de cráter. A) Dr. Juan Gregorio Rejas Ayuga, Rafael Corrales y Manuel Hernandez; B) Colecta, codificación y georreferenciación GPS de las Muestras en Valle, Honduras. Elaboración propia.

De la recolección de muestras de rocas, se identificaron por sus características físicas y visuales rocas con silicatos, unas se encontraban con evidencia de exposición a altas temperaturas, al formarse y cristalizarse, así como grava volcánica con una matriz no muy consolidada y con rastros de materia orgánica (ver Figura 41).



Parte de la gira de campo fue la visita a un aparato volcánico, con la intención de reconocer los materiales rocosos presentes en este, así como la recolección de muestras para ser analizadas posteriormente con técnicas de radiometría en una primera aproximación. Entre las rocas recolectadas provenientes del Volcán San Cristóbal en Chinandega, Nicaragua (ver Figura 42) estas mostraron un contenido de silicatos de hierro y magnesio, grava volcánica con material orgánico y roca de arenisca con alto contenido de azufre (las que se caracterizan por su coloración amarillenta).

Para la gira y colecta en el Volcán San Cristóbal se contó con un permiso especial del INETER de Nicaragua, quien mantiene una estación de vigilancia dentro del Área Protegida denominada Parque Natural Volcán San Cristóbal.



Radiometría

La radiometría de campo se centró en la medición de materiales con los que se verificó las firmas espectrales de coberturas de suelo desnudo y de suelos con pastos secos, necesarias para la calibración de la imagen, debido a la estación (seca) del año en que fue adquirida la imagen satelital, (Figura 43).

Ya que la información de la radiometría de campo está basada o configurada para poder compararla con los datos extraíbles de la imagen satelital, en este caso de una imagen LandSat TM, describimos sus características:

Cada imagen de este sensor contiene información en rangos de las 7 bandas espectrales, los cuales se encuentran en: Rango visible: azul (banda 1), verde (banda 2), rojo (banda 3), infrarrojo cercano (banda 4), infrarrojo medio (banda 5), infrarrojo termal (banda 6) e infrarrojo medio (banda 7).

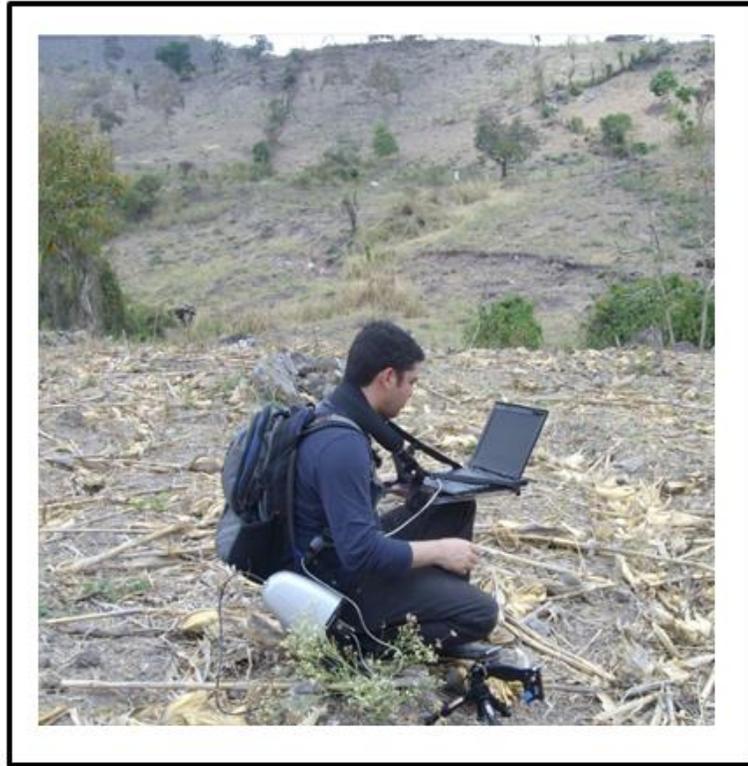


Figura 43. Calibración radiométrica para la imagen LandSat. Elaboración propia.

Los datos de campo con el espectro-radiómetro (ASD UV/VIS/NEARIR), son correlativos a datos de laboratorio o patrones estandarizados para imágenes del sensor LandSat, respecto a los resultados de las firmas espectrales de cada muestra que será procesada en laboratorio.

A continuación se presentan las gráficas de la radiometría de campo que permite establecer las condiciones en las que se encuentran los diferentes materiales del suelo, fenológicas y climatológicas (Figura 44, en donde por un lado tenemos dos gráficas de suelo (A, B) la primera de correspondiente a suelos o tierras blancas, y la segunda correspondiente a gravas, en la zona de Nacaome, muy cerca de uno de los cráteres identificados en la imagen por los procesos metodológicos establecidos; y una tercera gráfica con vegetación típica de la zona, correspondiente a pastos en condiciones secas (C). De los suelos y gravas, se observó la curva típica, baja

reflectancia a nivel del infrarrojo medio del espectro electromagnético, el cual corresponde a una absorción por humedad, la cual también guarda relación por las condiciones del área de estudio (altas temperaturas y muy baja humedad del suelo).

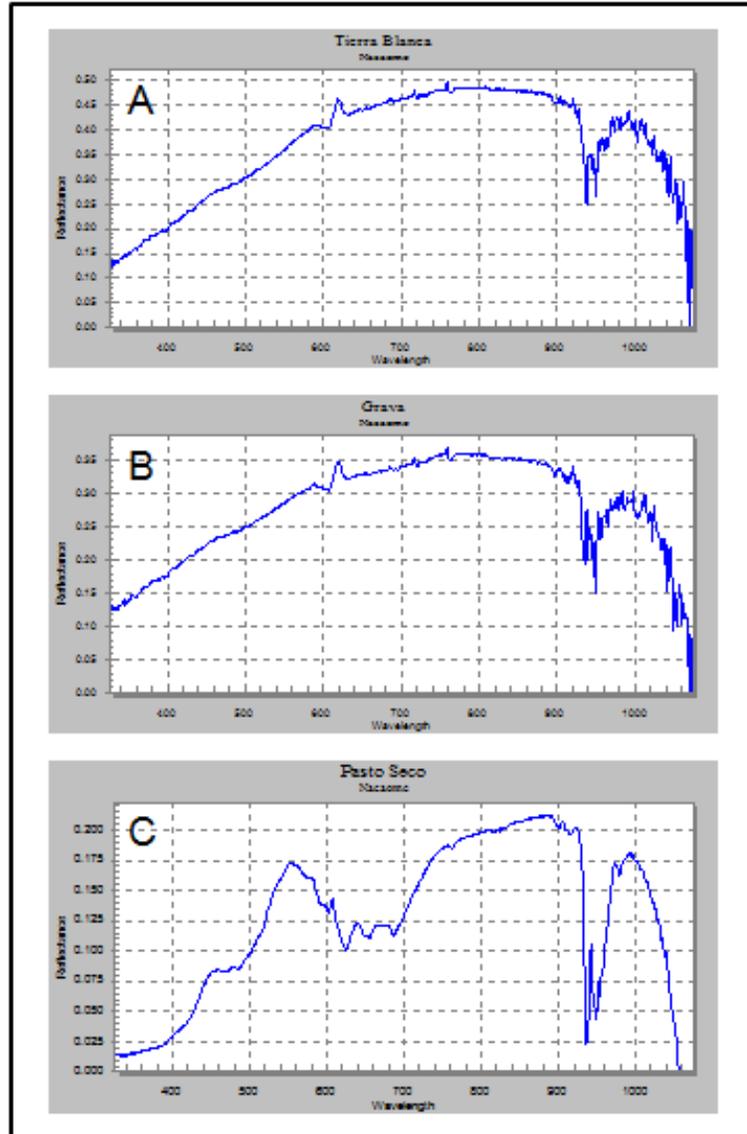


Figura 44. Firmas espectrales de suelo desnudos (A y B) y vegetación seca (C), en el Sur de Honduras. Elaboración propia.

Las condiciones del área y la época del año en que se desarrolló la gira de campo (época seca del primer trimestre del año), hizo que la curva de reflectancia fuera típica para vegetación seca con un pico en el canal rojo y una disminución en el

infrarojo cercano o canal cuatro, así como una absorción de la reflectancia en el infrarojo medio mayor al encontrado en los suelos.

Los datos de campo son correlativos a datos de laboratorio o patrones estandarizados para imágenes del sensor Landsat, por lo que con esto se están apoyando los resultados de las firmas espectrales de cada muestra procesada en laboratorio, con lo propuesto para las cicatrices de antiguos cráteres de orígenes volcánicos en la zona Sur de Honduras.

Los resultados de las muestras procesadas en laboratorio, una vez que se realizó la calibración de campo, arrojaron efectivamente una correspondencia al rango de rocas volcánicas, las tres muestras de rocas de la zona de estudio (cráter) del sur de Honduras se encuentran radiométricamente a una amplitud centrada en los mismos rangos de rocas encontradas en el volcán San Cristóbal, tal como se muestra en la Figura 45, apoyando que aunque en la zona Sur de Honduras no hay actividad volcánica, como las muestras de la zona del Volcán San Cristóbal, el cual mantiene actividad tipo fumarola, apoya la idea de que las áreas identificadas provienen de un cráter de origen definitivamente volcánica.

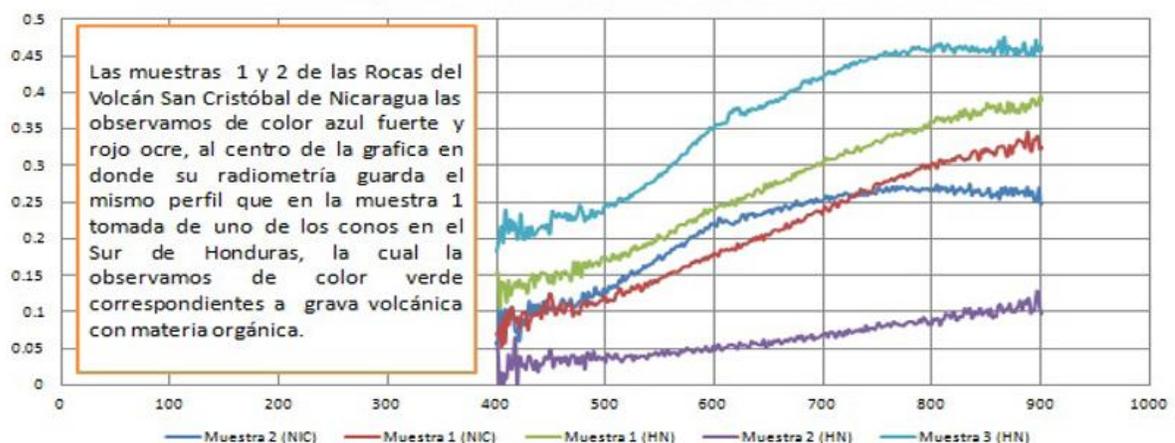


Figura 45. Firmas espectrales del material rocoso del Volcán San Cristóbal (Nicaragua) y de la zona de un cráter al sur de Honduras. Elaboración propia.

Sistemas de Información Geográfica

El SIG de integración de datos para la administración y despliegue de información en esta investigación se realizó utilizando el software de uso libre: gvSIG Desktop, un Sistema de Información Geográfica (SIG), una aplicación de escritorio diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas, la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión en todos los ambitos.

gvSIG, se caracteriza por disponer de una interfaz amigable, siendo capaz de acceder a los formatos más comunes, tanto vectoriales como ráster y cuenta con un amplio número de herramientas para trabajar con información de naturaleza geográfica (herramientas de consulta, creación de mapas, geo procesamiento, redes, etc.) que lo convierten en una herramienta ideal para usuarios que trabajen con la componente territorial (Figura 46).

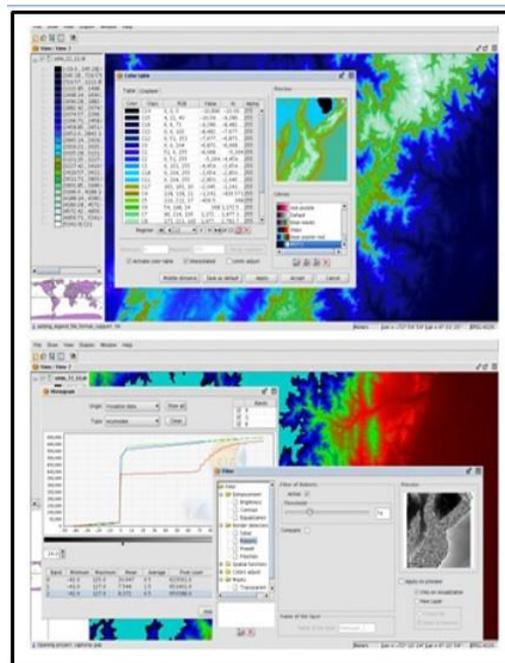


Figura 46. Programa SIG de uso libre, para manejar información vectorial y rasterizada (gvSIG: www.qvsig.org).

Por otra parte, y de igual manera se utilizó el software QGIS de uso libre, el cual también presenta las características generales que debe cumplir el estándar internacional para manejo de datos espaciales, y que en los últimos años se ha potenciado, permitiendo advenir procesos de análisis y tratamiento de imágenes digitales con la incorporación de extensiones o siendo plataforma de software compatibles, por lo que su uso como software libre fue determinante en este estudio, manejando las imágenes satelitales, derivando el modelo digital de tierra MDT, el modelo de sombras Hillshade, la aplicación de filtros, y su calculadora ráster, (Figura 47).

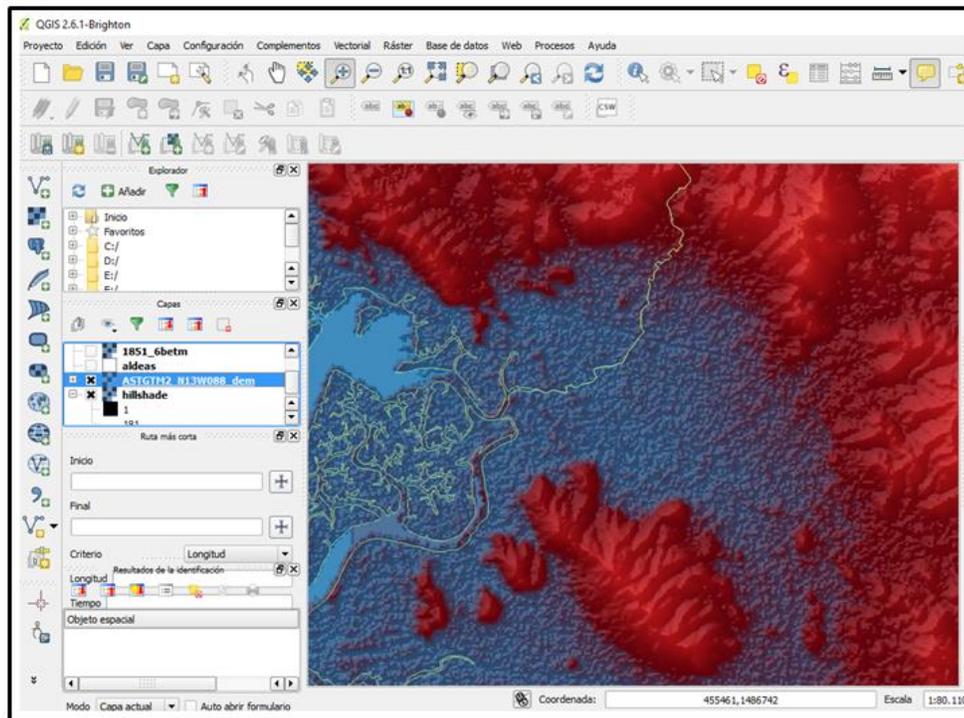


Figura 47. Integración de datos vectoriales y rasterizados del área de estudio, en ambiente QGIS. Elaboración propia.

Tipología de los Cráteres

Los cráteres identificados en la zona Sur de Honduras, primero corresponden a cicatrices de lo que fueran cráteres volcánicos, los cuales por su ubicación y

contacto con agua marina, se caracterizaron por ser de tipo freato-magmática explosiva, las cuales tuvieron erupciones violentas, provocando pequeños valles calderas, diferenciándose de los cráteres por el tamaño de estos, ya que los cráteres volcánicos pocas veces superan los dos kilómetros de diámetro. Lo que los ubica en los llamados Maar (Figura 48), si observamos las características de las tres formaciones identificadas podemos observar una topografía negativa provocando que las erupciones excavaras hacia dentro de la superficie inicial del cráter.

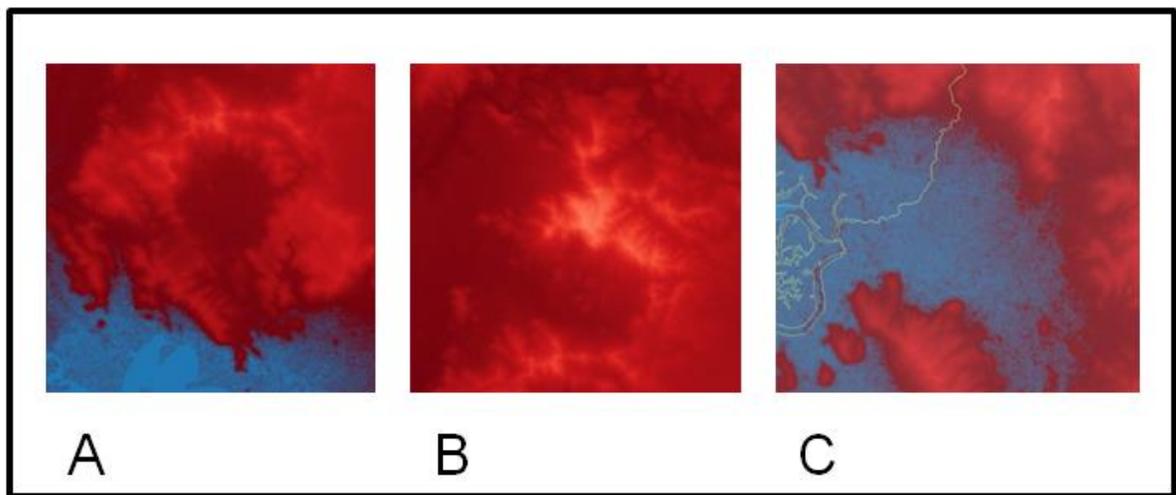


Figura 48. Calderas de tipo Maar, con formación dolomítica. Elaboración propia.

Estas formaciones principalmente del Terciario, fueron empujadas de la franja de fuego, por la depresión central de El Salvador y de Nicaragua, formando de esa manera la Depresión Central de Honduras (Figura 49), la que cruza el país, y que posteriormente en el Cuaternario se cubriera por la deposición de material sedimentario, lo podemos ilustrar muy bien con el mapa geológico simplificado de Centroamérica de Schmidt, 2011, como se muestra en la Figura 50.

En la zona también se vuelve evidente el desarrollo de domamiento de rocas intrusivas. El domamiento y fracturación del bloque central se presume fue debido a la misma actividad magmática, con clastos de riolita, en forma de domos, desde fracturas en anillo periféricas a la formación central, formando domos resurgentes, todo observable en las tres formaciones encontradas.

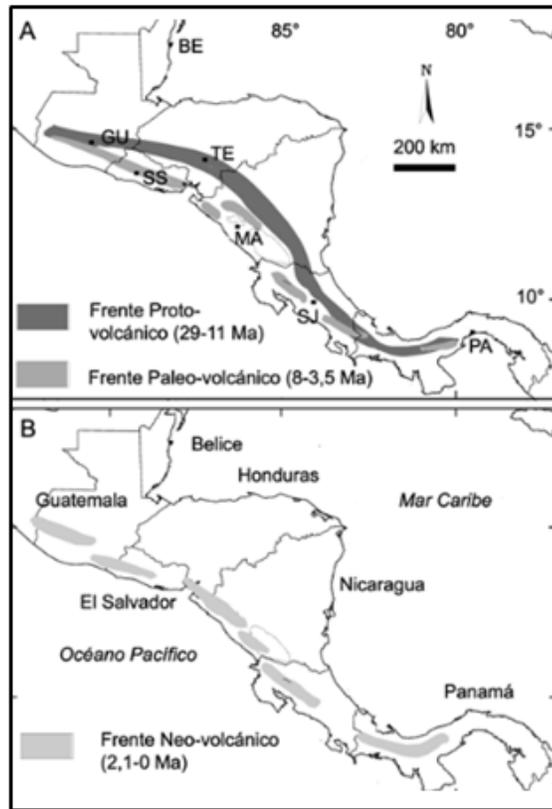


Figura 49. Mapa geológico simplificado de Centroamérica de Schmidt, 2011.

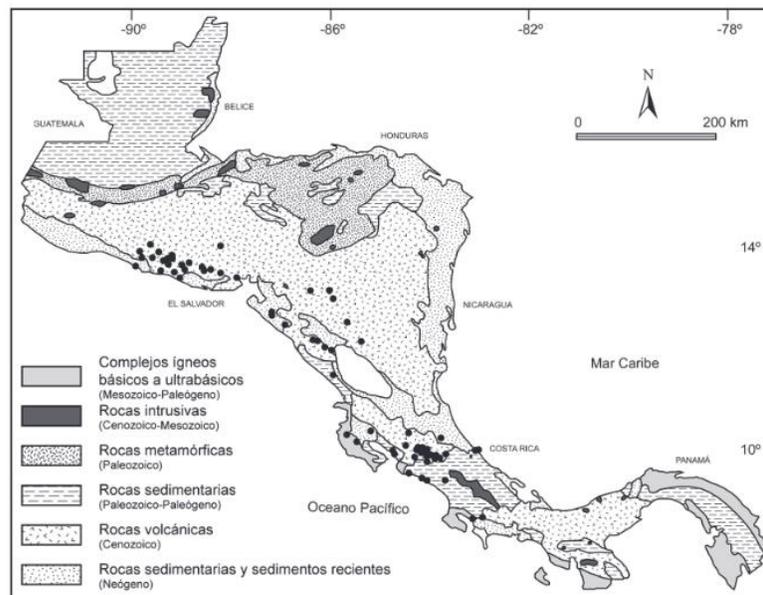


Figura 50. Movimiento de las formaciones Volcánicas en Centroamérica.

Alvarado & Gans, 2012.

DISCUSION

Por una parte, los resultados obtenidos metodológicamente, se encuentran dentro de los parámetros documentados por varios investigadores de las aplicaciones de técnicas de percepción remota, específicamente en el caso de la radiometría de los suelos se obtuvieron los resultados esperados en base al tipo de condiciones ambientales predominantes en el área de estudio, donde los suelos mantienen un porcentaje de humedad muy bajo (Figura 51), así como de las relaciones esperadas de suelos con presencia de óxidos de hierro, característicos de materiales con algún tipo de alteración hidrotermal, comparado con radiometría de laboratorio que muestra los patrones que debemos esperar a nivel de las diferentes bandas o canales del espectro electromagnético, tal como se muestra en la Figura 52.

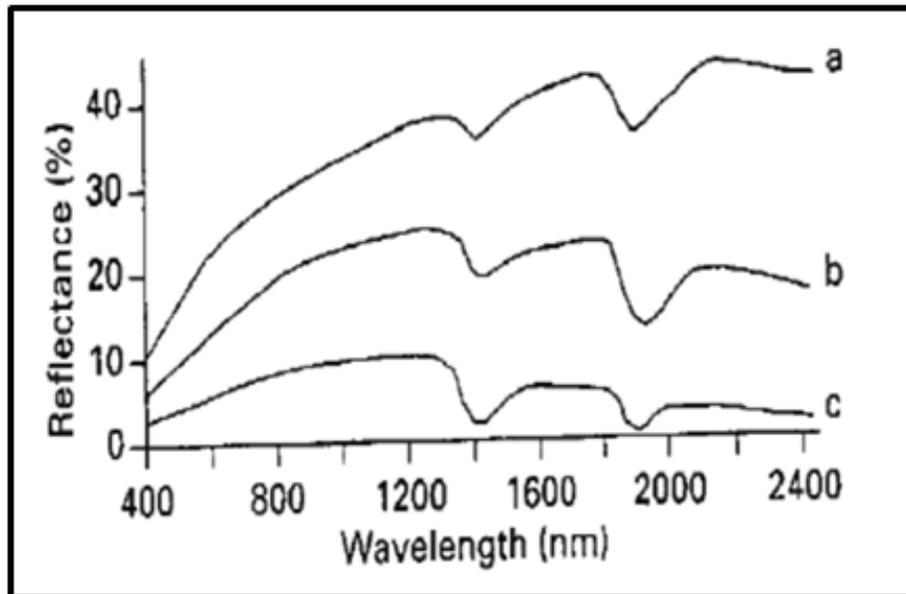


Figura 51. Curvas de reflectancia del suelo por porcentaje de humedad, a) 5%, b) 20% y c) 40%. (Jensen, 1996).

Con respecto a los resultados de la aplicación de filtros de borde en la imagen del sensor Landsat, no es suficiente para tener una base clara en la obtención de cráteres de tipo caldera, debido que estos están muy intervenidos y se encuentran a

nivel de una simple cicatriz de cráteres, por lo que fue importante, considerar las variables de alteraciones hidrotermales para contrastar e identificar cráteres volcánicos.

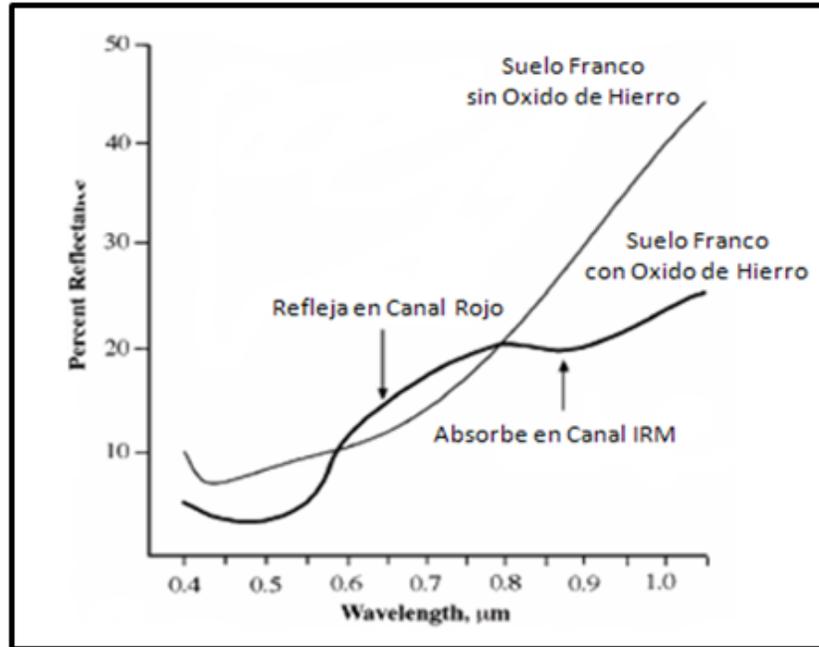


Figura 52. Curva de reflectancia de suelos francos con y sin óxidos de hierro.

(Jensen, 1996)

Respecto al análisis de alteraciones hidrotermales, uno de los factores a tomar en cuenta, es la presencia de vegetación, que al momento de realizar el cálculo a través de las diferentes técnicas de análisis de componentes principales con imágenes del sensor LandSat, se pierde precisión por la obstrucción de las coberturas de masas vegetales, sin embargo, en efecto, la temperatura del fluido y el pH del mismo son los factores más relevantes en la asociación mineralógica resultante de los procesos de alteración hidrotermal, más que la litología.

Maksaev V., 2003, planteó seis factores que controlan a la alteración hidrotermal de las rocas:

- 1) Temperatura y la diferencia de temperatura (Δt°) entre la roca y el fluido que la invade: mientras más caliente el fluido mayor será el efecto sobre la mineralogía original.
- 2) Composición del fluido; sobre todo el pH del fluido hidrotermal: mientras más bajo el pH (fluido más ácido) mayor será el efecto sobre los minerales originales.
- 3) Permeabilidad de la roca: Una roca compacta y sin permeabilidad no podrá ser invadida por fluidos hidrotermales para causar efectos de alteración. Sin embargo, los fluidos pueden producir fracturas hidráulicas de las rocas o disolución de minerales generando permeabilidad secundaria en ellas.
- 4) Duración de la interacción agua/roca y variaciones de la razón agua/roca. Mientras mayor volumen de aguas calientes circulen por las rocas y por mayor tiempo, las modificaciones mineralógicas serán más completas.
- 5) Composición de la roca; la proporción de minerales es relevante para grados menos intensos de alteración, dado que los distintos minerales tienen distinta susceptibilidad a ser alterados, pero en alteraciones intensas la mineralogía resultante es esencialmente independiente del tipo de roca original.
- 6) Presión: este es un efecto indirecto, pero controla procesos secundarios como la profundidad de ebullición de fluidos, fracturas hidráulicas (generación de brechas hidrotermales) y erupción o explosiones hidrotermales.

Es evidente que la zona de estudio, no presenta un volcanismo activo, más que áreas con un nivel freático cercano a la superficie y que en algunos sitios se encuentran manantiales de aguas termales, por lo que el riesgo de erupciones es casi nulo, no así el riesgo sísmico, (Figura 53) provocado por la región en

subducción en la placa de Cocos, y que desplaza o libera energía en la zona de la Depresión de Honduras, en la zona central del país, así mismo por la presencia de la Falla del Río Choluteca, la Falla del Río Texiguat, las más resaltantes en la zona baja del Sur del país, y que no siempre son representadas (Figura 54).

Según El Comité Permanente de Contingencia COPECO, la zona es vulnerable ambientalmente (Figura 55), en la zona se presentan altas temperaturas y déficit de precipitación, volviendo la región vulnerable a sequía.

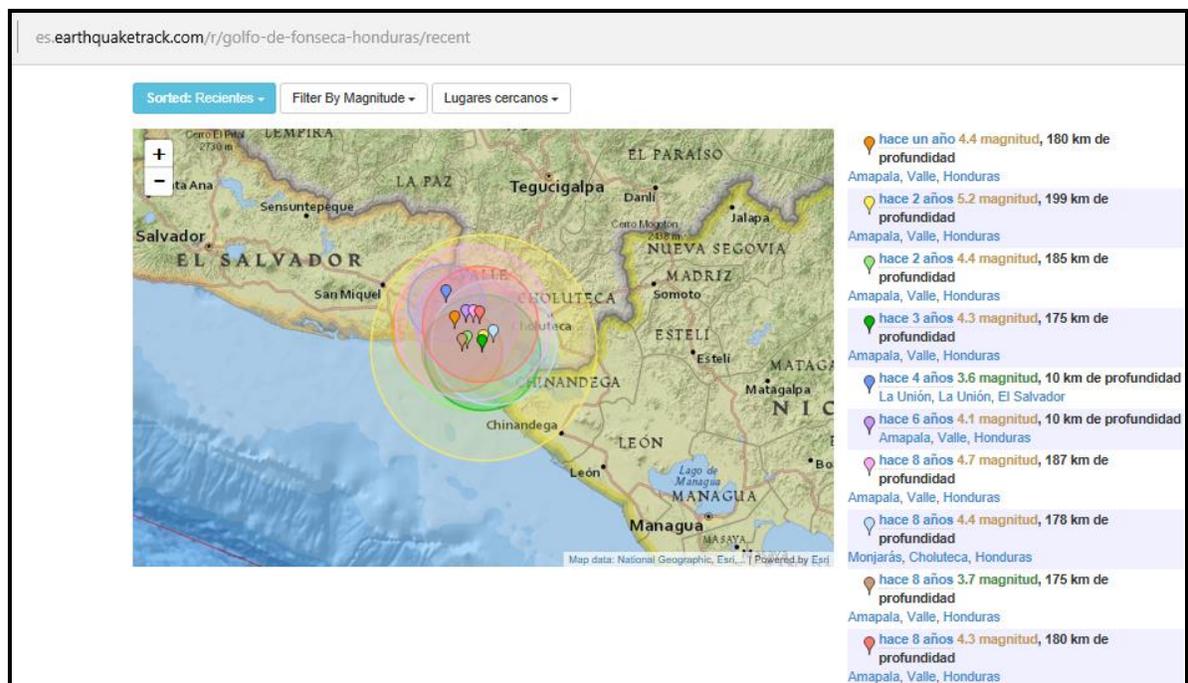


Figura 53. Sismicidad de la Región del Golfo de Fonseca. <http://es.earthquaketrack.com/r/golfo-de-fonseca-honduras/recent>.

En la actualidad el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), tanto como la accesibilidad a imágenes digitales captadas desde sensores remotos en orbitas espaciales, permiten estudiar las diferentes características de la geología de la superficie, así como de la derivación de Modelos Digitales del Terreno (MDT), que destacan la geomorfología de la misma superficie, permiten comparar incluso características en otros cuerpos celestes, ejemplo de ello es el trabajo desarrollado

por Hernandez, J. 2016, en el cual realizó un estudio de la caracterización geomorfológica de canales mayores, en el sector de kasei valles del planeta marte, mediante la integración de información obtenida por las misiones espaciales mars global surveyor, mars reconnaissance orbiter, mars odyssey y mars express, con el objetivo de caracterizar la geomorfología de los canales mayores en el sector de Kasei Valles del Planeta Marte a partir de procesamiento digital de imágenes satelitales, con el propósito de proponer un esquema evolutivo bajo el cual se originó este conjunto de geofomas. Como trabajo de graduación de la Maestría en Teledetección, en la Universidad Católica de Manizales.

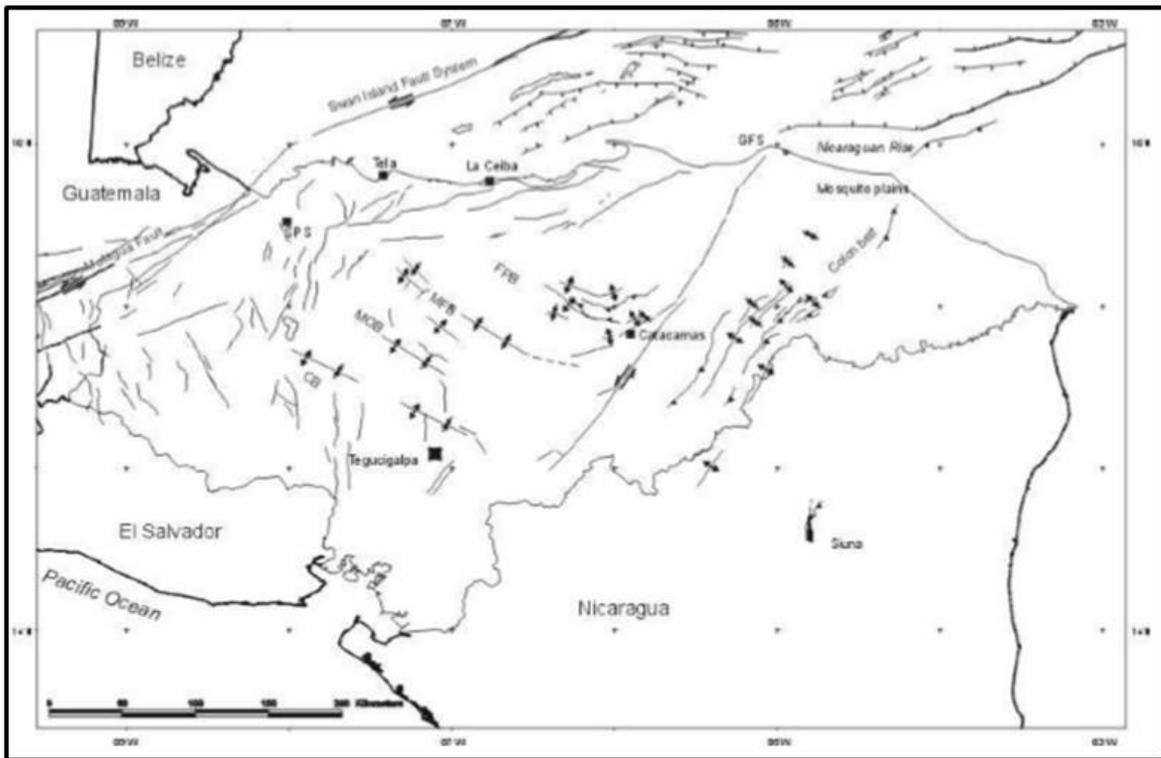


Figura 54. Mapa de Fallas y Lineamientos de Honduras. Honduras Geology.

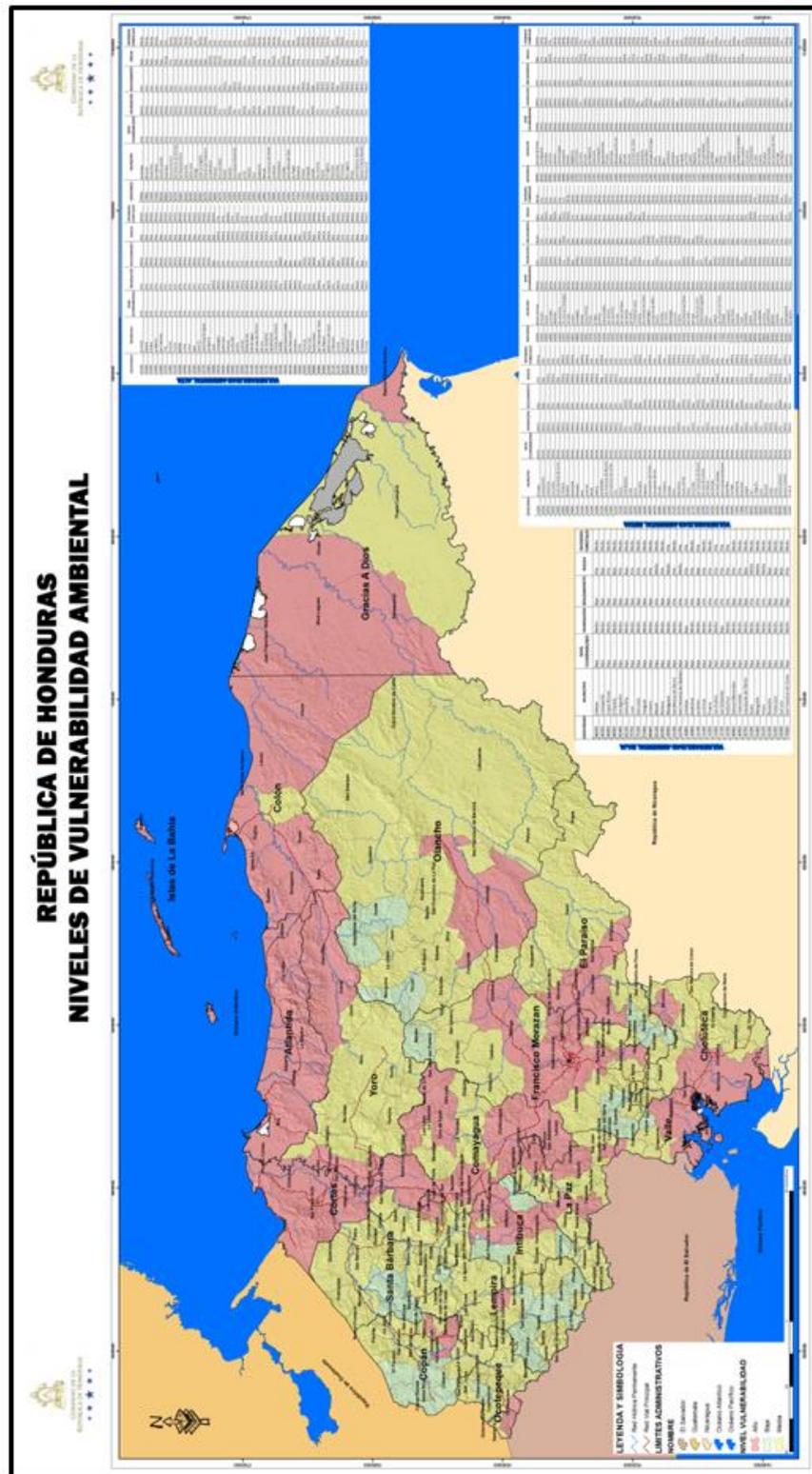


Figura 55. Mapa de niveles de vulnerabilidad ambiental. COPECO.

CONCLUSIONES

- La aplicación de la metodología propuesta, dio como resultado la identificación de tres áreas potenciales de formaciones geológicas propias de actividad volcánica, y que forman parte de cicatrices de cráteres, dicha identificación geomorfológica fue el resultado de la aplicación del Modelo Digital del Terreno (MDT), ya que el desgaste y el uso actual del suelo evitaron que se pudieran detectar a simple vista o por aplicación de filtros que resalten los efectos de bordes.
- La validación de campo se realizó con técnicas de percepción remota, mostrando ser una alternativa que se puede aplicar in situ (en el lugar de origen donde se colectaron las rocas) o en ex situ (analizar las muestras de rocas en un ambiente controlado en laboratorio), a través de mediciones con un espectro radiométricamente, entre las muestras encontradas y las muestras control (material del Volcán San Cristóbal de Chinandega, Nicaragua). Como resultado de esto se obtuvieron diferentes firmas espectrales de las rocas, mismas que mostraron patrones con tendencias de reflectancia de rocas de la misma fuente de origen volcánica.
- Los resultados radiométricos de las firmas espectrales indicaron similitudes semejantes en reflectancia debido al rango de sensibilidad del sensor el cual únicamente tiene 700 canales en el rango del Visible (frecuencia de la luz azul, verde y roja) al infrarrojo cercano y escasamente al infrarrojo medio), datos que hubieron podido mejorarse con la utilización de un sensor que alcanzara las frecuencias de rangos del infrarrojo medio y térmico. Sin embargo las pruebas fueron positivas y el uso del radiómetro cumplió con su finalidad de definir los orígenes de las rocas presentes en el área de estudio, con muestras de un evidente cráter de volcán.

- Otros elementos que apoyaron esta investigación, fue la presencia/ausencia de material magnético (hierro), aplicando pruebas rápidas de magnetismo en el área, los resultados arrojaron que los suelos presentaban un pobre contenido de hierro. Esto se puede interpretar como la no presencia de cráteres de origen meteórico, sino evidentemente volcánico, y por su forma en dos de ellos de tipo explosivo, dando lugar a calderas del tipo en Maar.
- La aplicación de filtros de bordes y lineamientos, funciona pero para cráteres bien definidos, siendo incapaz de discriminar por sí mismo, una caldera como las identificadas en este estudio.
- Los derivados del SRTM en MDT, fueron determinantes para este estudio, logrando discriminar los tres cráteres, los cuales se aproximaron al tipo de calderas conocida como Maar, por sus características topográficas negativas, así como, de la integración y el cruce de datos como las alteraciones hidrotermales, el MDT, el Hillshade y otros archivos vectoriales de referencia en este estudio, se lograron integrar con la ayuda de un Sistema de Información Geográfico, hecho que volvió preciso los resultados para la localización y georreferenciación de las antiguas calderas.
- En términos generales esta metodología se podría aplicar en otras áreas del país para identificar zonas ya sea volcánicas envejecidas o incluso cráteres de posibles impactos meteóricos muy antiguos y de diferentes magnitud de tamaño., considerando la meteorización de las rocas y la actividad humana, como elementos que disminuyen la identificación los diferentes tipos de cráteres.
- Respecto a la gestión de riesgos, fue evidente que en la zona no existe peligro de erupciones volcánicas, pero si se volvió evidente que el mayor riesgo de la zona es el sísmico y el ambiental (vulnerable a sequía), debido a

las cercanía de fallas geológicas, la Falla del Río Choluteca y la Falla del Río Texigual, correspondiente a la Depresión Central de Honduras, la que cruza el país, por Francisco Morazán, Comayagua y Cortés y actividad volcánica y por otro lado a patrones de déficit de precipitación en la zona, así como de inundaciones por aumentos en las mareas, intrusión salina.

RECOMENDACIONES

- Después de realizar este trabajo de investigación la mayor recomendación es completar la cobertura del territorio nacional y contrastar información de los diferentes conos volcánicos, así como aquellos rasgos más característicos con formaciones que evidencien diferentes tipos de cráteres, así como seguir aplicando los métodos de percepción remota y los derivados de los Modelos Digitales del Terreno, con miras a realizar una documentación exhaustiva de las diferentes características geológicas.
- Existe evidencia de posibles formaciones volcánicas, las cuales podrían confirmarse o validarse, como ejemplo de ello a continuación se muestra para la región del departamento de El Paraíso, una imagen derivada del MDT (Figura 56) y de una imagen Satelital del sensor LandSat de la misma zona (Figura 57).
- Ampliar el estudio a la búsqueda de cráteres de origen meteórico, usando una metodología similar, con las variantes que ayuden a describir las áreas más propensas a zonas de impacto.

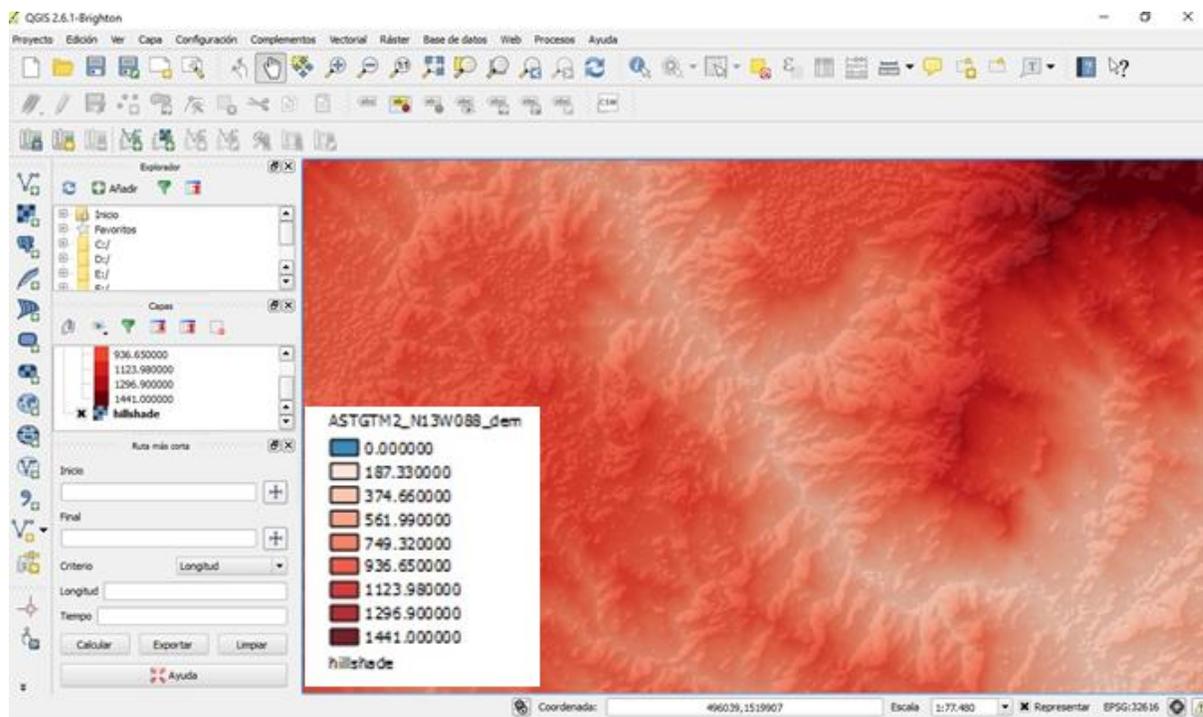


Figura 56. Modelo Digital del Terreno, zona del Departamento de El Paraíso.

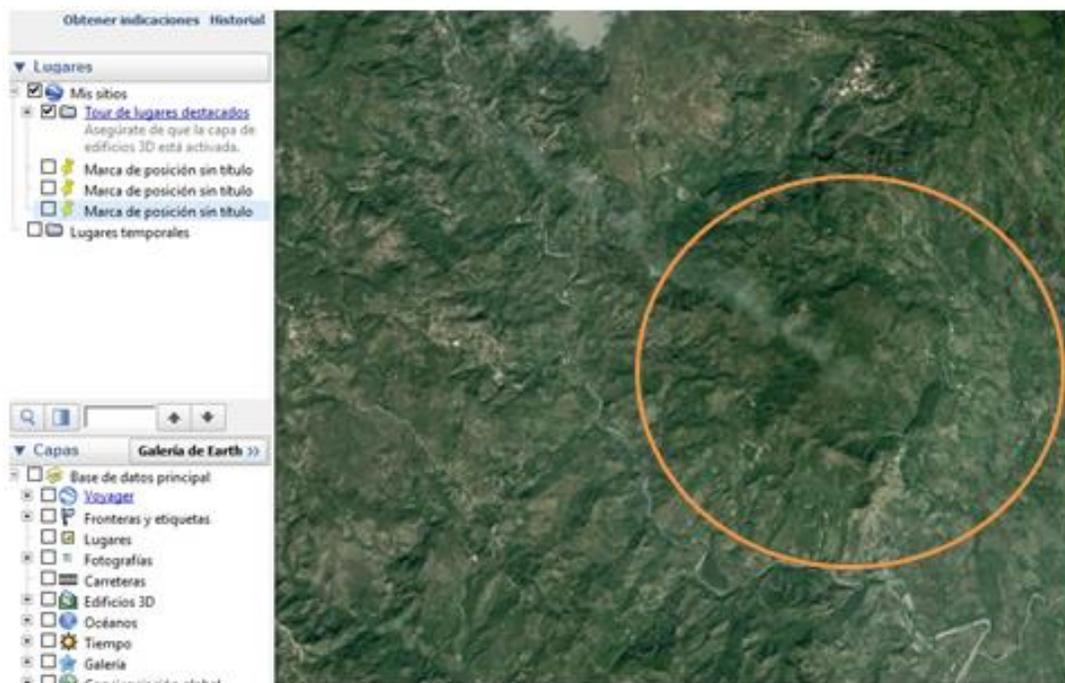


Figura 57. Imagen del Sensor LandSat, zona del Departamento de El Paraíso.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Aldalur, B y M. Santamaría. (2002). Realce de imágenes: filtrado espacial. Revista de Teledetección. 2002. 17: 31-42. Universidad Nacional del Sur Bahía Blanca, Argentina.
2. Alvarado G & P, Gans. (2012). síntesis geocronológica del magmatismo, metamorfismo y metalogenia de costa rica, américa central. Revista Geológica de América Central, 46: 7-122, 2012. ISSN: 0256-7024.
3. Baxes, G. A. (1994). Digital Image Processing Principles and Applications. U.S.A. John Wiley & Sons.
4. Bragado, E., Rejas, J.G., Marchamalo M. & Martínez, R. (2008). Characterization of hydrothermally altered materials in the Central Volcanic Range. Costa Rica: Using TM data.
5. Buzai, G, C. Baxendale, N. Principi, M. Cruz, G. Cacace, N. Caloni, H. Humacata. (2013). Sistemas de Información Geográfica (SIG) Teoría y Aplicación. PRODISIG-Universidad Nacional de Lujan. Argentina. ISBN 978 987 9285 43 5.
6. Cambio Climático (2007a) – Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (978052188010-7 Libro; 978 0521 70597-4 Folleto).
7. Cambio Climático (2007b) – Mitigación del Cambio Climático. Contribución del Grupo de Trabajo III al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (978052188011-4 Libro; 978 0521 70598-1 Folleto).

8. Córdoba, P. (2009). Uso de radiometría de campo VNIR para determinar propiedades en suelos mediterráneos de zonas áridas y semiáridas. Universidad Miguel Hernández de Elche.
9. Corrales, R. (2015) Tratamiento digital de imágenes satelitales para la búsqueda y clasificación de cráteres en la Zona Sur de Honduras. Revista Ciencias Espaciales. DOI: <http://dx.doi.org/10.5377/ce.v8i2.2086>.
10. Corrales R. & J. G. Rejas. (2012) Alteración hidrotermal y dinámica de cobertura de suelos, métodos de teledetección, valle de Choluteca, Honduras. Bases científicas para el desarrollo rural comunitario. 176 pp. Universidad Politécnica de Madrid, Programa de Cooperación Comunidad Agua y Bosque en Centroamérica. Madrid, 2012 (España). ISBN: 84-7493-467-2.
11. Cráter. Consultado en febrero de 2016, en la página: <http://www.ecured.cu/Cr%C3%A1ter>.
12. Dacey, M. (1970). Linguistics aspects of maps and geographic information. Ontario Geography. 5:71-80.
13. Delendatti, G. (2003). "Caracterización de zonas alteración hidrotermal en las imágenes del río Castaño, provincia de San Juan, mediante procesamiento digital de imágenes TM". Revista de la Asociación Geológica de Argentina, 58 (1): pp. 97-108.
14. Doyle, F.J. (1978). "Digital terrain models: an overview". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 44(12): 1481-1485.
15. Elvir, R. (1997). Mapa Geotectónico de la República de Honduras. Primera Edición. Instituto Geográfico Nacional.

16. ESA (ESA Eduspace) (s.f.) Disponible en: http://www.esa.int/esaMI/Eduspace_ES/SEM6DYD3GXF_0.html. (Consultado en la página web, en mayo del 2012).
17. Felicísimo, A. (1994). Modelos Digitales del Terreno. Introducción y Aplicación en Ciencias Ambientales. Consultado en el 2016, en la página: <https://www.researchgate.net/publication/232423519>.
18. GEOINFO. <http://www.geoinfo-int.com/htmls/sig.html>
19. gvSIG. Portal gvSIG (s.f.) Disponible en: <http://www.gvsig.org/web/projects/gvsig-desktop/tour/image-gallery/> (Consultado en la página web, en agosto del 2012).
20. Hernández J. J. Martínez, P. Serrato (2016). Caracterización geomorfológica de canales mayores, en el sector de kasei valles del planeta marte, mediante la integración de información obtenida por las misiones espaciales mars global surveyor, mars reconnaissance orbiter, mars odyssey y mars express. Tesis Maestría en Teledetección. Universidad Católica de Manizales, Colombia. 147 pp.
21. Honduras Geology. <http://geology.csustan.edu/rrogers/honduras/>
Jensen, J. R. (1996). Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. Second Edition. Prentice Hall.
22. IGAC. (2013). Descripción y Corrección de Productos LandSat 8. LDCM. Bogotá, Colombia. Consultado en: www.igac.gov.co - ciaf@igac.gov.co. 15 de Julio de 2015.

23. Imágenes Satelitales LandSat. Consultada en Noviembre 2016, en la página: <http://www.imagenesgeograficas.com/Landsat.html>.
24. Keipi, K., S. Mora, P. Bastidas. (2005). http://www.eird.org/cd/toolkit08/material/proteccion-infraestructura/gestion_de_riesgo_de_amenaza/8_gestion_de_riesgo.pdf. (Consultado en la página web, en febrero del 2016).
25. Lugo Hubp, J. (1996). La Superficie de la Tierra. Un Vistazo a un Mundo Cambiante. Segunda Edición. D. R. © 1995, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA. Carretera Picacho-Ajusco 227; 14200 México, D.F. ISBN 968-16-5107-3.
26. Maksaev, V. (2003). "GL 54 A. Metalogénesis. Capítulo 8. Alteraciones hidrotermales". Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Departamento de Geología. Disponible en: <http://www.cec.uchile.cl/~vmaksaev/metalogenesis.html>.
27. Moellering, H. (1983): "Designing interactive cartographic systems using the concepts of real and virtual maps". En Clarke, K.C. (1990:5).
28. Olaya, V. (2011). Sistema de Información Geográfico. Creative Common Atribución. Consultado en noviembre 2012 en la página: http://wiki.osgeo.org/wiki/Libro_SIG.
29. Richards, J. A. (1995). Remote Sensing Digital Image Analysis - An Introduction. Berlín. Springer-Verlag.
30. Russ, J. C. 1998. The Image Processing Handbook. Piscataway. CRC Press - IEEE Press.

31. Sanchez, F, R. Tejero, J.F. Bergamin de la Viña. (1998). Análisis de la Variabilidad del Relieve a partir de Modelos Digitales del Terreno. Depto. De Geodinámica. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense. 28040 Madrid. Revista Sociedad Geológica de España. 11(1-2), 1998.
32. Suárez, G., W. Sanchez. (2012). Desastres, Riesgos y Desarrollo en Honduras. Delineando los Vínculos entre el Desarrollo Humano y la Construcción de Riesgo en Honduras. PNUD-Honduras. 75 pp.
33. SIGMUR. SIG y Teledetección en la Universidad de Murcia, Tomado en 2016, (http://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node25_mn.html)
34. Schumann, GJ-P; Bates, PD; D.J., Lunt; Valdes, PJ. (2008). Measuring change in the Earth system". Proceedings of the remote sensing and photogrammetry society conference. University of Exeter.
35. Smith, O, S. L. Ustin, J.B. Adams, and A. R Gillespie (1990). "A regional measure of abundance from multispectral images. Remote Sensing Environ. , Vol. 31, pp. 1-26.
36. Schmidt, V. (2011). Clasificación de suelos basada en el cálculo de razones espectrales en sitios donde se ubican estaciones acelerográficas de América Central. Casos de El Salvador, Nicaragua y Costa Rica. Revista Geológica de América Central, 44: 9-26, 2011. ISSN: 0256-7024.
37. Terremotos recientes cerca de Golfo De Fonseca, Honduras. Consultado en la página: <http://es.earthquaketrack.com/r/golfo-de-fonseca-honduras/recent>.

38. Toselli, A. (2010). Elementos Basicos de Petrología Ignea. Cap. IV. Volcanismo. Instituto Superior de Correlación Geológica. Miscelania 18. ISSN 1668-3242 en línea. Consultado en noviembre de 2015 en página: http://www.insugeo.org.ar/publicacion_miscelanea.php?id=53.
39. Vásquez J., A. Arquero y E. Martínez (2007). Aplicación de modelos estadísticos a la selección eficiente de cubiertas tipo mediante radiometría de campo.
40. Tindall, J. (2006). Deconvolution of Plant Type(s) for Homeland Security Enforcement Using Remote Sensing on a UAV Collection Platform. The Journal of the NPS Center for Homeland Defense and Security. <https://www.hsaj.org/articles/175>.