

---

---

# METODOLOGÍA PARA LA PROSPECCIÓN DE NIQUEL UTILIZANDO TÉCNICAS DE SENSORES REMOTOS

## METHODOLOGY FOR THE EXPLORATION OF NICKEL USING REMOTE SENSING TECHNIQUES

---

---

*Germán Vargas Cuervo<sup>1</sup> & Carlos A. Rodríguez Rodríguez<sup>2</sup>*

*1. Geólogo, MsC, PhD. Profesor Universidad Nacional de Colombia*

*2. Geólogo Senior, MsC. Gerente de Exploración y Geología. Cerro Matoso S.A., Colombia  
gvargasc@unal.edu.co*

Recibido para evaluación: 25 de Noviembre de 2008 / Aceptación: 15 de Mayo de 2009 / Recibida versión final: 28 de Mayo de 2009

### RESUMEN

Los sensores remotos o teledetección, es una técnica que evoluciona constantemente, consiguiendo cada vez mejores aplicaciones en las ciencias de la tierra y en particular en la prospección de recursos minerales. Sus características espectrales, permiten día a día obtener productos satelitales, con una mayor discriminación de bandas espectrales con imágenes entre 9 bandas como Landsat ETM a 250 bandas de las imágenes hiperespectrales, imágenes con resoluciones espaciales entre 1 o mas kilómetros, las meteorológicas de unos pocos centímetros como Quickbird o Ikonos. Igualmente la disponibilidad gratuita de algunas de ellas en Internet y la liberación de un gran numero de programas de procesamiento facilitan el uso de está importante técnica en diversas áreas geocientíficas. En este trabajo se presenta un avance en el desarrollo metodológico en la prospección de Níquel, utilizando técnicas de sensores remotos y aplicando indicadores geológicos y geomorfológicos. La metodología propuesta comprende cinco etapas principales, las cuales se resumen así: a) identificación de sensores remotos y procesamiento digital de imágenes de satélite, b) definición de indicadores geológicos, c) determinación de indicadores geomorfológicos, d) definición del modelo de evaluación de prospectos y e) aplicación de resultados. Esta metodología fue aplicada en el estudio realizado para Cerro Matoso S.A. en Colombia en el 2006, en 48 zonas potenciales localizadas en la región fisiográfica del Caribe, la región o terreno geotectónico denominado Cauca - Romeral y la región Pacífica.

### PALABRAS CLAVES:

Níquel, Laterita, Sensores Remotos, Geomorfología, Geología, Prospección, Recursos minerales, Colombia.

### ABSTRACT

Remote sensing is a technique to carry out constantly, it's allowing best ever applications in earth sciences and, specially, for mineral resources prospecting. Its spectral characteristics to enable satellite products every day, with greater spectral bands discrimination with images from 9 bands as Landsat ETM bands 9 to 250 bands of hyperspectral images, it's the spatial resolutions from 1 or more kilometers to the meteorological ones at a few centimeters as Quickbird or Ikonos. Anyway their internet free availability and the release of a large number of processing programs facilitate the use of this technique. This work presents a methodological research development for nickel prospection using remote sensing techniques and geological and geomorphological indicators. The proposed methodology comprises five main stages, as follows: a) identification of remote sensing and digital processing of satellite images, b) definition of geological indicators, c) identification of geomorphic indicators, d) in definition of evaluation model prospects and e) application of results. This methodology was applied in the study for Cerro Matoso SA in Colombia in 48 potential areas of study located in the physiographic region of the Caribbean, the region or geotectonic area known as Cauca - Romeral and the Pacific region.

### KEY WORDS:

Laterite, Remote Sensing, Geomorphology, Geology, Prospection, Minerals Resources, Colombia

## 1. INTRODUCCIÓN

Los estudios convencionales de Exploración de Níquel, se basan en estudios geológicos detallados, prospección geoquímica (principalmente de suelos), registros geofísicos, petrología y petrografía, en donde el componente de fotointerpretación, siempre ha sido una fase de trabajo básica.

El avance notable de las técnicas de sensores remotos satelitales con la obtención de imágenes en todo el planeta con tiempos de registro entre 16 días y horas, con el registro cada vez de porciones del espectro electromagnético en bandas espectrales entre el visible y las microondas, la capacidad de obtener imágenes y fotos digitales con resoluciones espaciales entre km y unos pocos centímetros propician cada vez más el uso de estas técnicas en la cartografía geológica y la prospección de recursos minerales. En la literatura científica los estudios de exploración de Níquel con técnicas de sensores remotos son muy escasos, constituyéndose éste estudio como una innovación en el tema.

En Colombia los estudios avanzados de prospección de Níquel, se restringen principalmente al área de Cerro Matoso en el municipio de Montelibano, Córdoba, por ser uno de los yacimientos más importantes de Colombia y Suramé rica. Entre estos se destacan los trabajos de Ortiz, 2004, quien hace una síntesis sobre los diversos materiales que constituyen la mineralización, distribución, características petrográficas, mineralógicas y la composición química del yacimiento de Níquel en el área de Cerro Matoso, Colombia, para establecer un modelo genético con repercusiones importantes en explotación; Mejía y Durango, 1982, realizan un estudio geológico de las lateritas Niquelíferas de Cerro Matoso S.A.; Álvarez y Muñoz, 1987, presentan un estudio de Cr, Ni y Co en las lateritas de las Dunitas de Medellín.

Sobre geomorfología asociada a lateritas, se destacan los trabajos de Anand y Butt, 2000, quienes presentan en las memorias del 20th Workshop del 2.001 denominado Regolith Geology and Exploration Geochemistry in Deeply Weathered terrains - a Perspective from three Continents" el estudio titulado Regolith-landform mapping.

El presente trabajo se realizó dentro del marco exploratorio de la investigación titulada; "Evaluación de áreas potenciales de Níquel, en Colombia, para la determinación de prospectos a partir de sensores remotos" realizado por Vargas, 2006 y presentado en el XIV Congreso Colombiano de Minería, en Medellín entre el 19 al 21 de Noviembre de 2008.

Otras aplicaciones de sensores remotos en prospección de recursos minerales en Colombia hacen referencia a los trabajos de Vargas, 2009, Vargas, 2008a-e, Vargas, 1998.

### 1.1. Las Lateritas

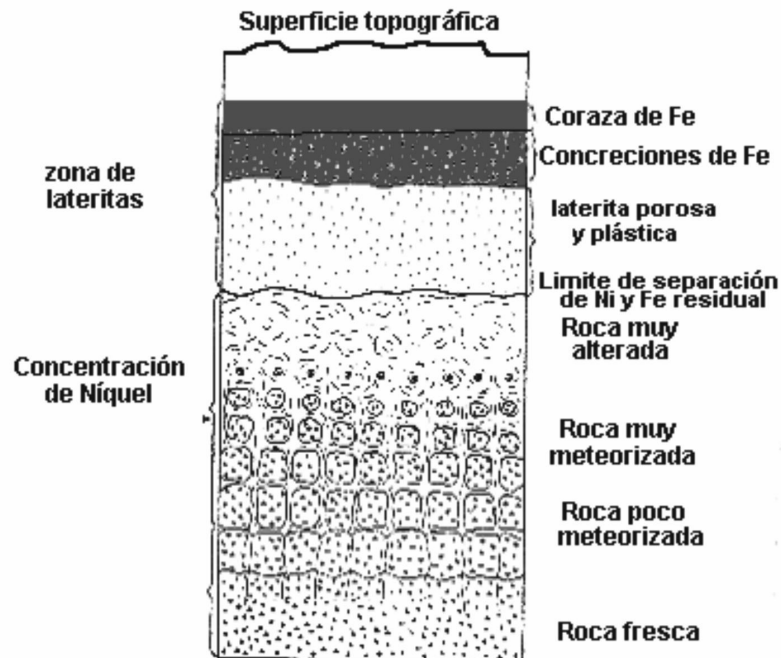
Las lateritas, se forman en zonas de relieve horizontal sobre rocas ricas en hierro, especialmente de rocas ígneas básicas o ultrabásicas, ricas en minerales ferromagnesianos como el olivino o el piroxeno. La hidrólisis de estos minerales, a través de serpentina y clorita principalmente, forma como productos finales óxidos/hidróxidos de hierro, sílice, y sales solubles de Mg y Ca (procedentes del clinopiroxeno). Algunos de los componentes minoritarios de estos minerales (Ni, Cr, Co) pueden también concentrarse en la laterita, aumentando sus posibilidades mineras.

Los yacimientos residuales relacionados con procesos exógenos, son mineralizaciones, que no han sufrido transporte, como las lateritas o bauxitas, es decir, son el resultado de una meteorización. Se produce una acumulación de minerales por separación gravitacional, pero sin transporte.

Las condiciones necesarias para su formación son:

- La roca o los yacimientos sub-económicos que se alteran, deben tener concentraciones de los elementos (Ni, Fe) suficiente para ser considerado un yacimiento.
- Las Lateritas se forman en un clima que favorezca la alteración química, condiciones que se dan muy bien en zonas tropicales.
- Deben existir unas condiciones morfológicas adecuadas, el relieve no debe superar los 3.000 m.sn.m por degradación fluvio-glaciaria.

- Son necesarios períodos de estabilidad cortical, que permitan las acumulaciones suficientes.
- La laterización está caracterizada por los siguientes procesos. Figura 1.



**Figura 1.** Perfil típico de una laterita de Hierro y Níquel

- Presencia de rocas ultramáficas, sometidas a cambios bruscos de temperatura y la circulación subterránea de las aguas por infiltración que alteran gradual y progresivamente a la roca ultramáfica, predominando la acción geoquímica de disolución o ataque sobre la mecánica de erosión.
- La infiltración de aguas por las fisuras o diaclasas, producidas por efecto de los esfuerzos dinámicos, ponen rápidamente en solución a los silicatos de magnesio y hierro anhidros. En esta etapa de alteración, la peridotita conserva su estructura primitiva.
- El aumento de la porosidad y la permeabilidad de la peridotita, facilita la penetración y circulación de las aguas con reacciones geoquímicas. La peridotita alterada presenta texturas progresivamente más terrosas hacia la superficie. Las aguas superficiales que se infiltran, probablemente ácidas, atraviesan la laterita porosa y se mantienen durante algún tiempo en la porción inferior plástica de esta zona, poniendo a los minerales que se encuentran en la peridotita alterada en soluciones que pueden precipitarse al descender constituyendo entonces las concentraciones explotables de níquel, o que también pueden ser arrastrados en solución.
- Después del eventual relleno de los espacios disponibles (poros y cavidades) las soluciones níquelíferas circularían a modo de aguas subterráneas sobre la superficie impermeable de la peridotita serpentizada situada a cierta profundidad deslizándose entre los bloques de peridotita y ciertas zonas serpentinosas impermeables. El níquel se concentraría únicamente al hallar las condiciones favorables para su precipitación en este proceso y a cierta profundidad, ya que estos precipitados no son estables ni insolubles sino al estar protegidos por una capa o recubrimiento laterítico
- El níquel se encuentra difuso en la masa peridotítica alterada. Esto sólo se evidencia en los análisis químicos; no es explotable, pero la mineralización contribuye a la concentración posterior
- Enriquecimiento en níquel, hierro y cobalto. El límite que separa las zonas enriquecidas en níquel de las enriquecidas en hierro generalmente es pronunciado y se manifiesta en un cambio de color que se convierte en marrón oscuro al

pasar de la peridotita terrosa mineralizada a la laterita. Este límite níquelífero avanza progresivamente en sentido descendente a medida que se incorporan el magnesio simultáneamente el espesor de la laterita residual ferruginosa aumenta gradualmente. Este desplazamiento progresivo hacia la base del límite níquel-hierro se denomina "descenso" de la laterita.

Según la USGS Mineral Deposit Models, por Donald A. Singer, el modelo geológico definido a este tipo de yacimientos minerales, corresponde al Tipo Superficial relacionado a inconformidades, Modelo Residual, Níquel Laterítico.

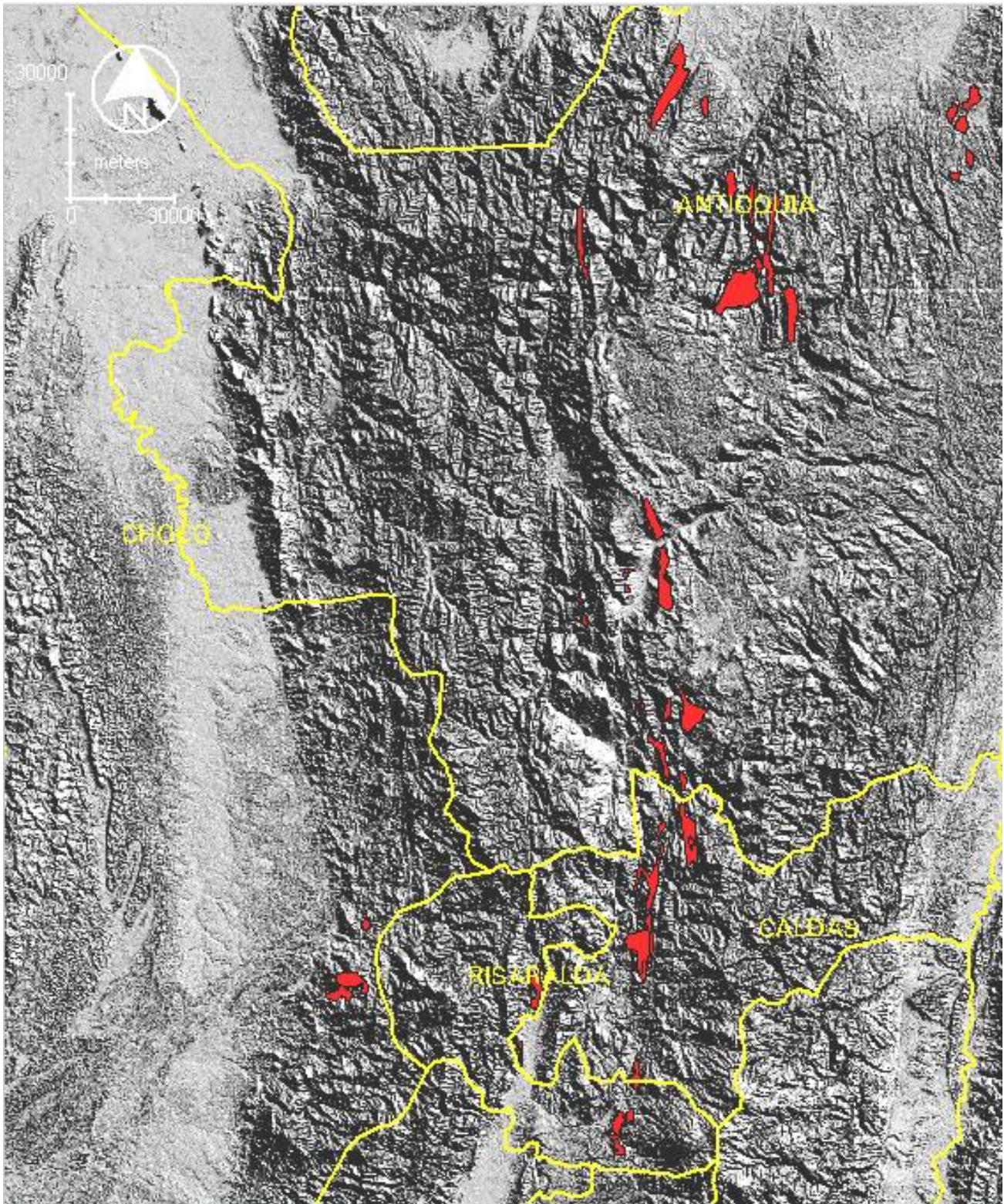
## 1.2. Rocas ultramáficas en Colombia

Las rocas ultramáficas en Colombia, se localizan en el occidente colombiano principalmente en la zona de sutura formada entre la Placa Pacífica y la Placa Suramericana denominada como Cauca Romeral, en la Península de la Guajira y en la Serranía del Baudó en el Pacífico colombiano. Un resumen de la estratigrafía de las principales unidades de rocas ultramáficas es presentado en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Principales rocas máficas y ultramáficas en Colombia (Ingeominas)

Región	Código	Plancha	Nombre
ROCAS MÁFICAS Y ULTRAMÁFICAS DE LA CORDILLERA CENTRAL Y OCCIDENTAL DE COLOMBIA	C2	I-8	Migmatitas por contacto de serpentinita
	Jus	130	Rocas Ultramáficas
	Jus	146	Rocas Ultramáficas
	Kau	387	Rocas ultramáficas de Guayabillos
	Kiov	N-6	Ofiolitas de la Vetica
	Kiu	Dep. Antioquia	Ultramáficos de Romeral
	Kiub	364	Complejo de rocas máficas y ultramáficas
	Kium	Dep. Antioquia	Dunitas de Medellín
	Klbg	386	Rocas ultramáficas de Guayabillos
	Kp	93	Complejo básico y ultrabásico de Ure
	Ks	223	Serpentinita de La Colonia
	Ks	H-8	Serpentinitas
	Ku	410	Rocas ultramáficas
	Ku	429	Rocas ultramáficas del Chacaguaico
	Kuh	147	Rocas Ultramáficas
	Kuh	166	Rocas Ultramáficas (Hanzburguitas)
	Kum	Dep. Antioquia	Ultramafitas de la Cordillera Occidental Romeral
	Kumsber	411	Ultramáficos San Bernardo
	Kup	167	Rocas Ultramáficas Peridotitas
	Kup	186	Rocas Ultramáficas
	Kup	187	Rocas Ultramáficas
	Kus	167	Rocas Ultramáficas
	Kus	186	Rocas Ultramáficas
	Kus	187	Rocas Ultramáficas
	Kus	387	Cuerpos ultramáficos
	Kusf	205	Rocas ultramáficas de Filadelfia
	Kuspi	205	Rocas máficas y ultramáficas de Anserma - Belén de Umbría
Kust	206	Ultramafitas serpentinizadas de Filadelfia	
S	I-8	Serpentinita	
Sp	I-9, H-9	Ultramáficas Serpentinita	
T	I-9, H-9	Ultramáficas Roca de Talco	

<b>CUERPOS MÁFICOS. Basaltos, diabasas, tobas, chert.</b>	Kcqv	N-6	Complejo Quebradagrande (Miembro Volcánico)
	Kia	187	Formación Abejorral
	Kisqg	Dept. Ant.	Complejo Quebradagrande
	Kivq	130	Formación Quebradagrande
	Kivq	146	Formación Quebradagrande (Miembro Volcánico)
	Ksc	167	Formación Quebradagrande (Miembro Sedimentario)
	Kv	167	Formación Quebradagrande (Miembro Volcánico)
	Kv	187	Formación Quebradagrande (Miembro Volcánico)
	Kvc	147	Formación Quebradagrande (Miembro Volcánico)
	Kvc	205	Complejo Quebradagrande
<b>ROCAS MÁFICAS ASOCIADAS A LA FALLA DE ROMERAL</b>	gsf	I-9,H-9	Gabro Hornbléndico de San Francisco
	Jgr	130	Gabros de Romeral
	Jgr	146	Gabros de Romeral
	Jkoga	261	Macizo Ofiolítico de Ginebra (Gabros)
	Jkoga	280	Macizo Ofiolítico de Ginebra (Gabros)
	Jkogu	280	Macizo Ofiolítico de Ginebra (Peridotitas)
	Jkub	261	Complejo Ultramáfico de Venus
	K2gd	386	Gabro de La Despensa
	Kg	147	GABROS
	Kg	166	GABROS
	Kg	167	GABROS
	Kg	186	GABROS
	Kg	187	GABROS
	Kg	223	Gabro de Río Bonito
	Kg	279	Gabros
	Kg	410	Gabros
	Kg	H-8	Metagabro
	Kga	205	Rocas máficas y ultramáficas de Anserma - Belén de Umbría
	Kgbapo	411	Gabros Aponte
	Kgc	299	Stock de Villa Carmelo
	Kgd	279	Stock el 18
	Kgd	299	Stock de El 18
	Kgh	147	Gabros de Hispania
	Kgh	166	Gabros de Hispania
	Kgh	H-8	Metagabro Hornbléndico
	Kghp	279	Stock El Palmar (Gabros-hornblendicos)
	Kgp	224	Grupo Diabásico
	Kgp	279	Stock El Palmar (Gabros-Noritas)
	Kgp	299	Stock de El Palmar
	Kgub	205	Rocas máficas y ultramáficas de Anserma - Belén de Umbría
	Kgz	279	Stock de Zabaleta
	Kia	187	FORMACION ABEJORRAL
	Kiot	N-6	Ofiolitas de La Tetilla
	Ksg	364	Gabros
	Ksga	146	Gabro de Altamira
	Ku (a)	242	Complejo Ultramáfico de Bolívar (Gabros)
	Ku (b)	242	Complejo Ultramáfico de Bolívar (Gabros olivínicos)
	Ku ©	242	Complejo Ultramáfico de Bolívar (Peridotitas)
	Kuba	261	Complejo Ultramáfico de Bolívar (Gabros y anfibolitas)
	Kubg	261	Complejo Ultramáfico de Bolívar (Gabros olivínicos)



**Figura 2.** Ejemplo de rocas ultramáficas (color rojo) en el noroccidente colombiano asociadas al sistema de fallas Cauca romeral.

## 2. METODOLOGIA

La metodología para la determinación de prospectos de Níquel, comprende cinco fases principales, estas son: a) identificación y procesamiento digital de imágenes de satélite, b) definición de indicadores geológicos, c) definición de indicadores geomorfológicos, d) determinación del modelo de evaluación de prospectos y e) aplicación de resultados. Figura 3.



Figura 3. Esquema generalizado de la metodología de trabajo.

## 3. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE SENSORES REMOTOS

Teniendo en cuenta que la base para la interpretación temática, son los sensores remotos, éstos se enfocaron a partir de dos características principales: a) resolución espectral adecuada en la cual permite obtener diferentes registros de los elementos geológicos y geomorfológicos, en diversos rangos del espectro electromagnético y b) resolución espacial adecuada para los alcances de estos estudios con resoluciones espaciales entre 30 m/píxel y 1 m/píxel. Para el primer caso se utilizan las imágenes Landsat (Figura 4) y para el segundo caso imágenes de alta resolución espacial como Spot (pancromáticas), imágenes Ikonos, Quickbird, fotografías aéreas digitales, etc.

En la fase de procesamiento digital de imágenes se realizan procesos de importación de imágenes, extracción de subimágenes de las zonas de interés, correcciones geométricas, realce espectral o radiométrico, realce espacial, elaboración de anaglifos (imágenes estereoscópicas en un solo plano imagen) y vistas 3D. Figura 5

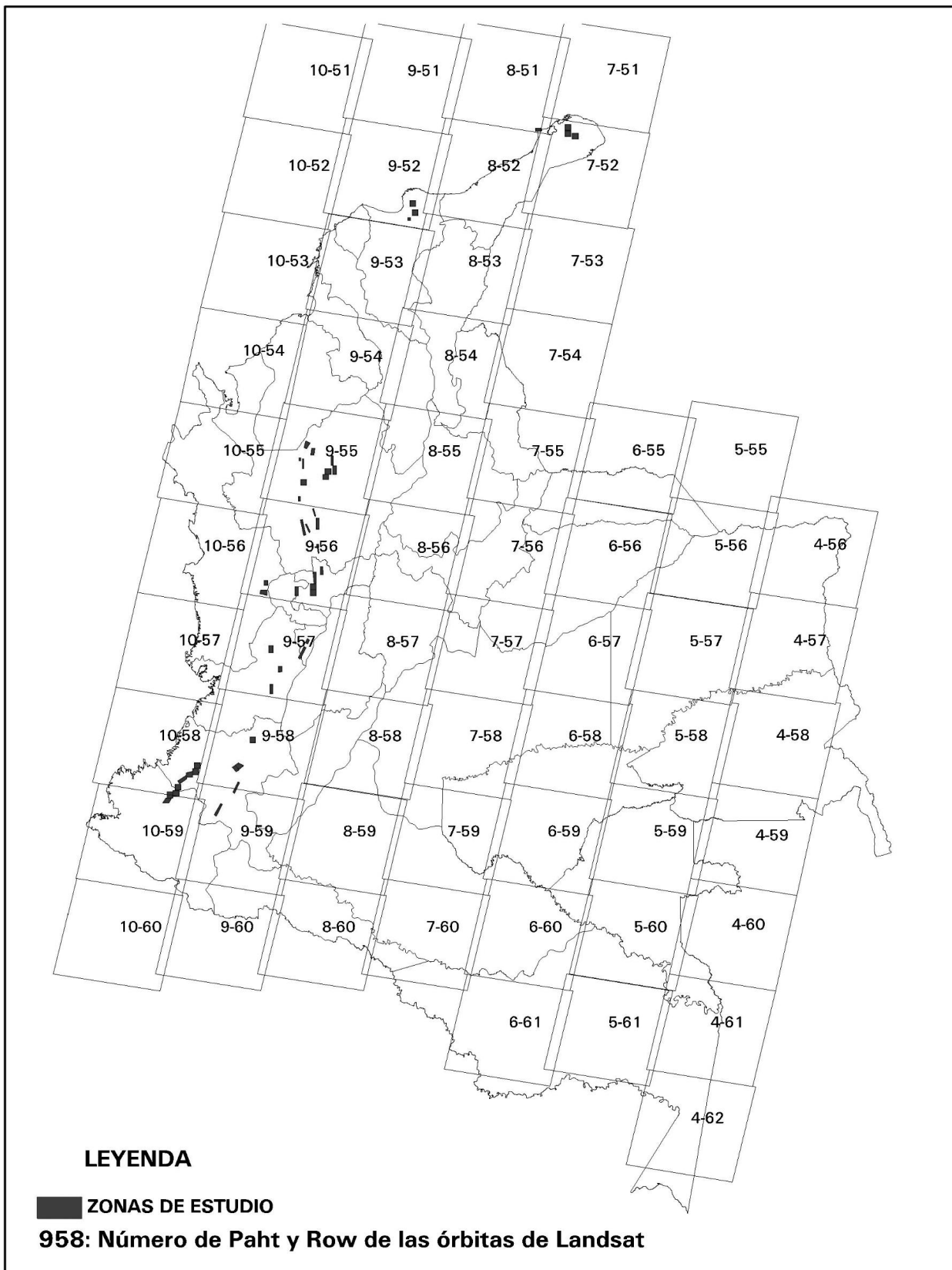


Figura 4. Ejemplo de escenas Landsat utilizadas en la investigación



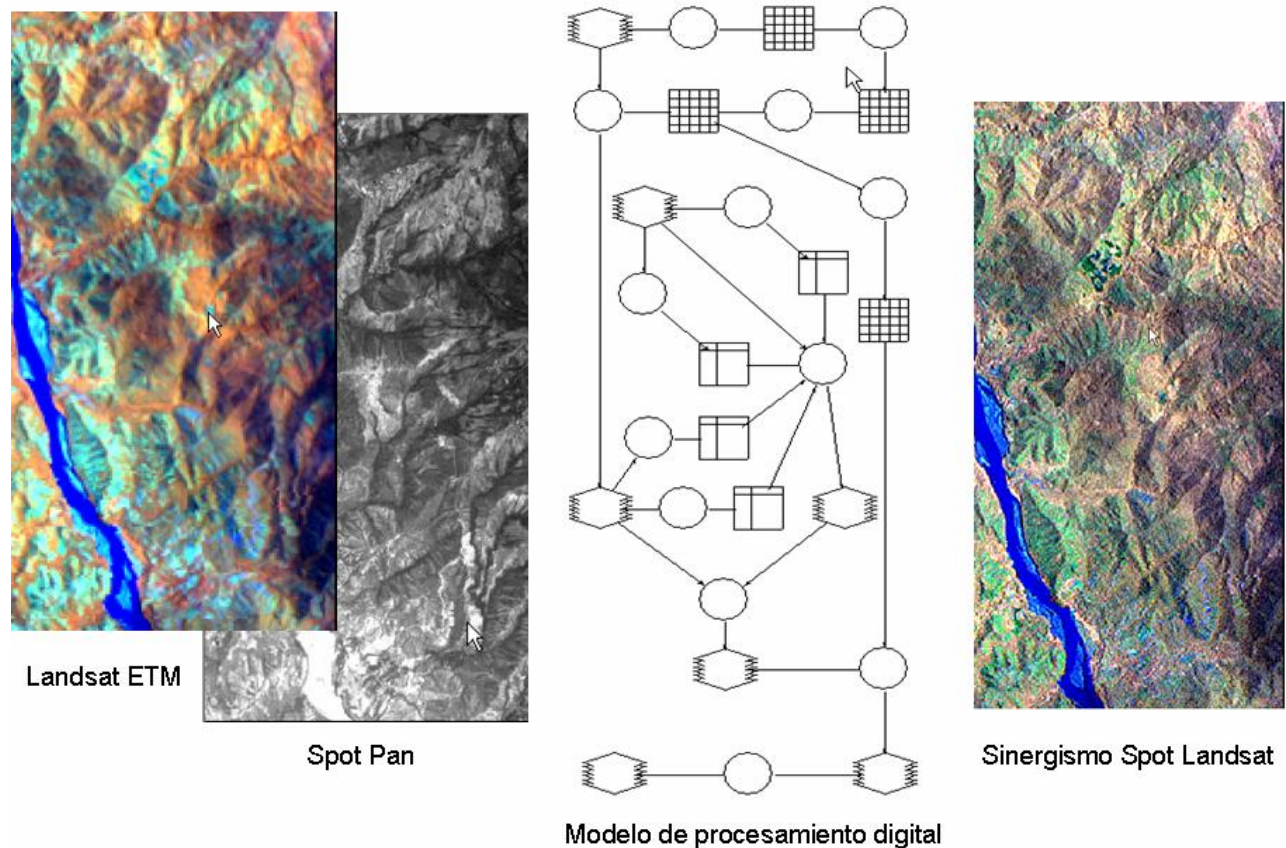


Figura 5. Ejemplo de realce espacial por sinergismo de una imagen Landsat

#### 4. INDICADOR GEOLÓGICO

La interpretación de las imágenes, se orienta principalmente hacia la definición de los prospectos de Ferro-níquel en las áreas potenciales bajo una visión regional y local. Para la interpretación se utilizan simultáneamente, diferentes imágenes generadas para cada zona con diferentes composiciones en falso color, color natural, vistas virtuales en 3D y anaglifos. Para cada área de interés, se realiza la interpretación de los rasgos estructurales, la determinación de zonas de rocas ultramáficas, la morfología asociada y la cartografía de las zonas de lateritas y la definición de prospectos con el análisis de la información anterior.

##### 4.1. Estructuras geológicas

Se identifican estructuras geológicas principalmente fallas en dos categorías principales: Estructuras regionales mayores y estructuras menores. Figura 6.

Estructuras regionales mayores. Corresponden principalmente a estructuras de tendencia regional con evidencias morfológicas y litológicas de corresponder a fallas geológicas.

Estructuras menores. Corresponden a estructuras semiregionales y locales que pueden estar asociadas a fallas menores, fracturas y diaclasas mayores.



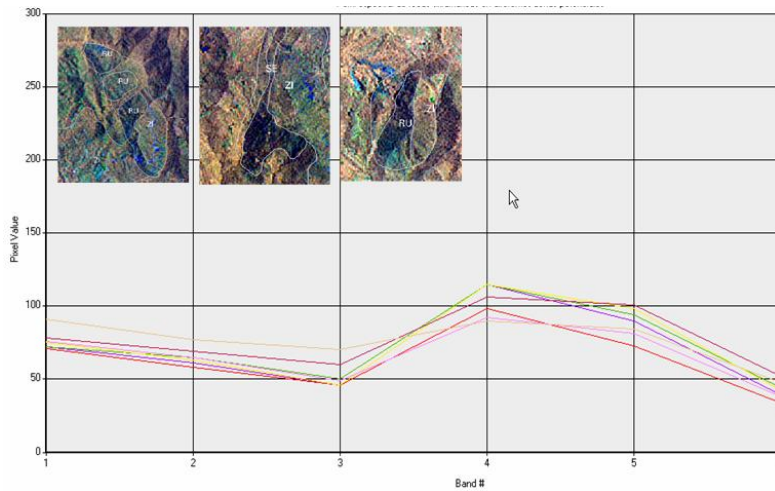
**Figura 6.** Ejemplo de interpretación estructural en cercanías de Santafé de Antioquia. En líneas rojas gruesas falla mayores y en líneas delgadas lineamientos estructurales menores. Imagen Landsat ETM, Bandas ETM3, ETM2, ETM1 (R,G,B)

#### 4.2. Rocas Ultramáficas

Mediante la evaluación de esta información, con la expresión morfológica, litología asociada y contraste espectral de estas áreas, sobre las diferentes imágenes generadas para cada afloramiento, se creó la necesidad de reinterpretar estas unidades de roca, que en algunos casos consistió en el afinamiento de los contactos y en otros la interpretación de nuevas unidades de roca o la eliminación de otras de referencia (Figura 7). Igualmente estas áreas se identificaron espectralmente mediante el análisis de su perfil o curva espectral determinando un comportamiento típico de todas esta zonas mostrando una reflectancia que disminuye hasta la banda roja (TM3) y aumenta ampliamente en las bandas del infrarrojo cercano y medio (TM4 y TM5) y disminuye nuevamente en el infrarrojo medio a lejano (TM7). Figura 8.



**Figura 7.** Ejemplo de interpretación (en amarillo) de la roca ultramáfica (RM) en una imagen Landsat TM, Bandas TM4, TM5, TM3 (R,G,B). Región de Campamento Antioquia.



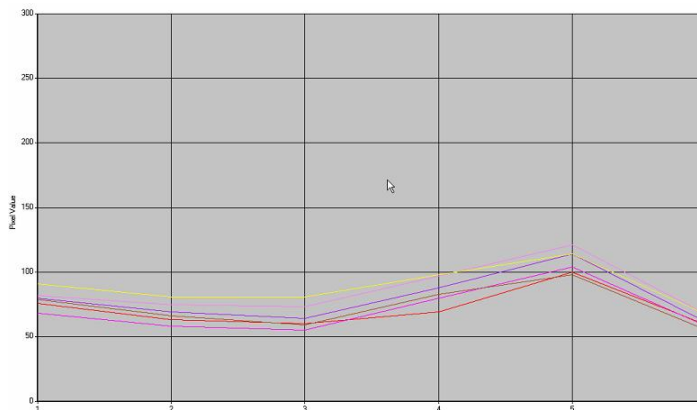
**Figura 8.** Curvas espectrales de diferentes afloramientos de rocas ultramáficas, mostrando una tendencia similar de reflectancia.

### 4.3. Lateritas

La identificación de las lateritas sobre las imágenes de satélite y sobre las rocas ultramáficas, muestra un alto contraste espectral y morfológico respecto a estas primeras (Figura 9). Un análisis comparativo de la respuesta espectral sobre imágenes Landsat TM en varios afloramientos, mostró un comportamiento típico como se muestra en la Figura 10.



**Figura 9.** Contraste espectral de una laterita (L) color claro sobre una roca ultramáfica. Imagen Landsat TM. Bandas TM4, TM5, TM3 (R,G,B)



**Figura 10.** Curvas espectrales de diferentes depósitos de lateritas mostrando un mismo comportamiento espectral.

## 5. INDICADOR GEOMORFOLÓGICO

Como indicador geomorfológico para la determinación de los prospectos, se definió la presencia de geoformas asociadas a lateritas desarrolladas, a partir de la descomposición, alteración, interperismo y/o meteorización in situ de rocas ultramáficas. Otra condición importante es que estos depósitos residuales se presenten poco afectados por procesos morfodinámicos sobre impuestos como derrubios, coluviones y depósitos fluvio-glaciares con una baja disección por drenaje. En este contexto Florez, 2003 estima la no presencia de estos depósitos por encima de los 3000 m.s.n.m por abrasión glacial.

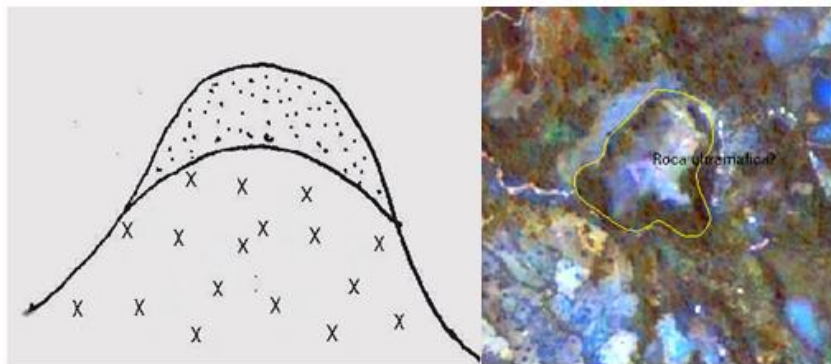
De acuerdo a la génesis de estos materiales o depósitos residuales, se dividieron ocho clases de geoformas así:

- Morfología de lateritas asociadas a filos y cimas de montaña (D11).
- Morfología de lateritas asociadas a altiplanos (D12).
- Morfología de lateritas asociadas a colinas y cerros residuales (D13)

- Morfología de lateritas asociadas a relieves bajos colinados (D14).
- Morfología de lateritas asociadas a laderas rectas monoclinales (D15)
- Morfología de lateritas asociadas a zonas de falla (D16).
- Morfología de lateritas asociadas a depresiones morfológicas en relieves altos (D17).
- Morfología de lateritas asociadas a pie de laderas (D18)

### 5.1. Morfología de lateritas asociadas a filos y cimas de montaña (D11)

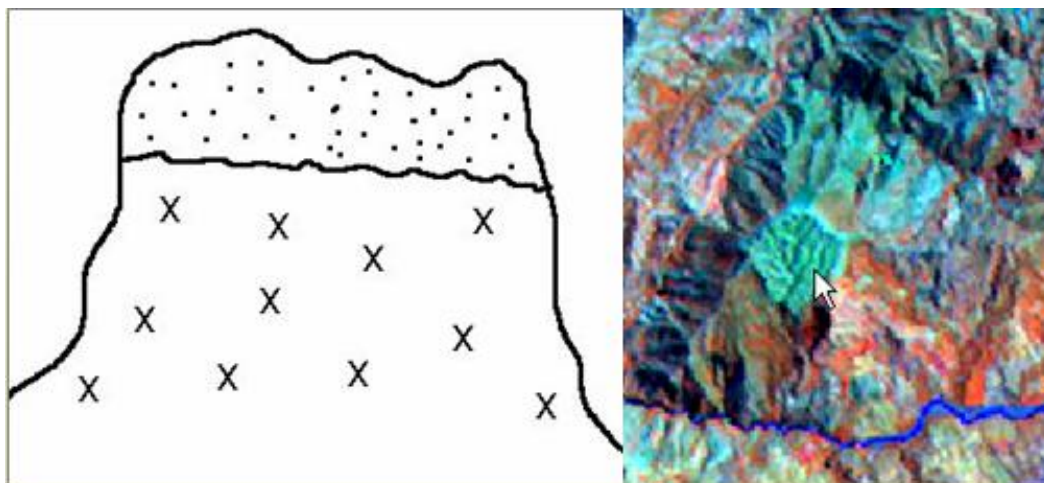
Estas geoformas se presentan en la parte superior de cerros y montañas que han sido disectadas por interfluvios, conservando sus depósitos residuales en la cima de estas morfologías. Son las geoformas mas encontradas en los estudios geomorfológicos y se presentan en diferentes cerros o montañas de contorno circular o semicircular de laderas convexas o en cerros alargados de laderas rectas y convexas. Figura 11



**Figura 11.** A la izquierda esquema de geoforma de lateritas asociadas a filos y cimas de montaña. El achurado de puntos indica los depósitos residuales y las x la roca ultramáfica. A la derecha imagen de satélite Landsat TM bandas TM3, TM2, TM1 (R,G,B) mostrando en la cima una coloración mas clara que se asocia a la presencia de las lateritas.

### 5.2. Morfología de lateritas asociadas a altiplanos (D12)

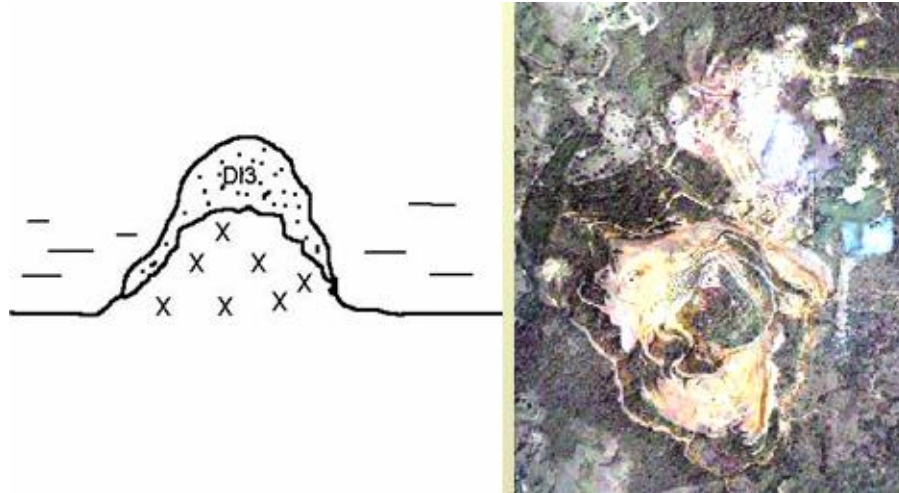
Son geoformas de depósitos residuales de posibles lateritas presentes en altiplanos. Estas geoformas se caracterizan por presentar pendientes abruptas en los costados y cimas con superficies planas u onduladas, semejjando a mesetas. Los depósitos se ubican en la parte superior de esta geoforma. Figura 12.



**Figura 12.** Esquema de morfología de posibles lateritas localizadas en altiplanos y ejemplo de imagen de satélite Landsat TM bandas TM4, TM5, TM3 (R,G,B) mostrando está morfología.

### 5.3. Morfología de lateritas asociadas a colinas y cerros residuales (D13)

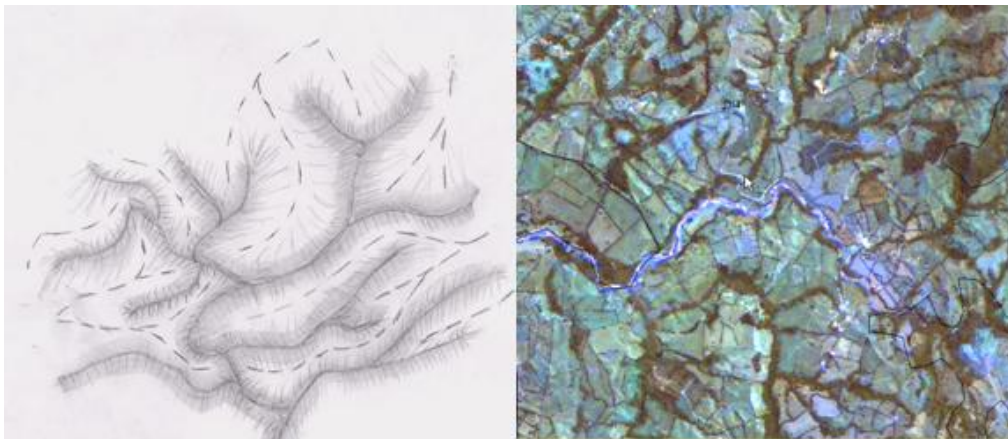
Corresponden a promontorios, colinas o cerros residuales por diferenciación denudacional que sobresalen en su entorno que es de relieve ondulado a plano. Un ejemplo de este tipo es Cerro Matoso. Figura 13



**Figura 13.** Esquema y ejemplo morfología de lateritas asociadas a cerros residuales. A la derecha sinergismo entre fotografía aérea e imagen digital Landsat TM. Sector Cerro Matoso, Montelibano, Córdoba.

### 5.4. Morfología de lateritas asociadas a relieves bajos colinados (D14).

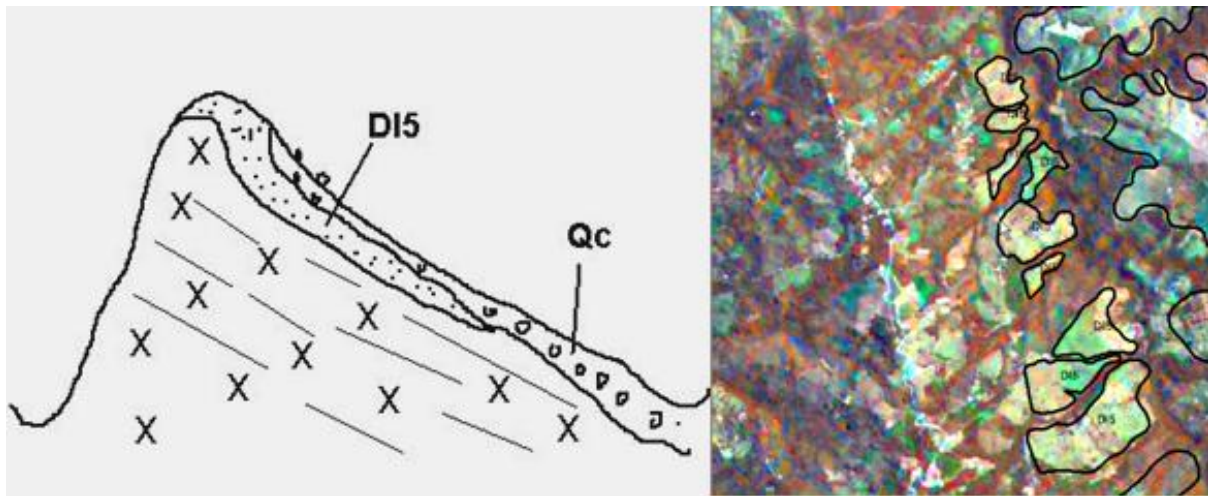
Corresponde a posibles lateritas relacionadas con relieves colinados bajos y superficies de aplanamiento con poca disección (modelado plano-cóncavo); se presentan discontinuamente en la parte superior de las colinas. Figura 14



**Figura 14.** Esquema e imagen Landsat TM bandas TM3, TM2, TM1 (R,G,B) de lateritas asociadas a relieves bajos colinados con poca disección

### 5.5. Morfología de lateritas asociadas a laderas rectas monoclinales (D15).

Esta morfología, se desarrolla localmente en relieves estructurales con montañas homoclinales con filos agudos, en donde una vertiente es abrupta y la otra es ligeramente inclinada. Los depósitos de lateritas se localizan sobre esta última ladera y generalmente con un aporte superficial de derrubios y depósitos coluviales. Figura 15

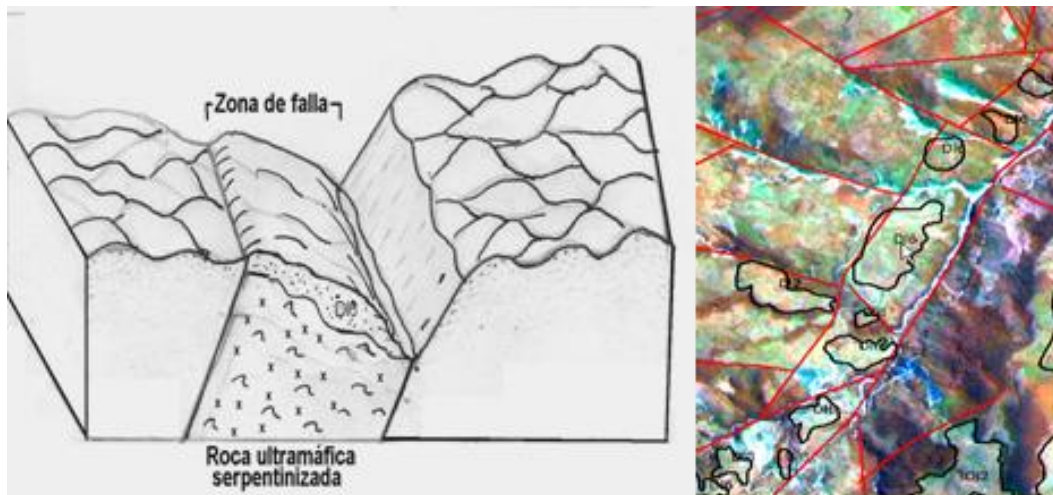


**Figura 15.** Esquema e imagen Landsat TM bandas TM4, TM5, TM3 (R,G,B) de lateritas asociadas a laderas rectas monoclinales.

### 5.6. Morfología de lateritas asociadas a zonas de falla (DI6)

En algunos corredores de zonas de fallas sobre rocas ultramáficas se desarrollan morfologías de aplanamiento por la descomposición de rocas cataclásticas ultramáficas, y desarrollo minerales de serpentina y talco. Figura 16

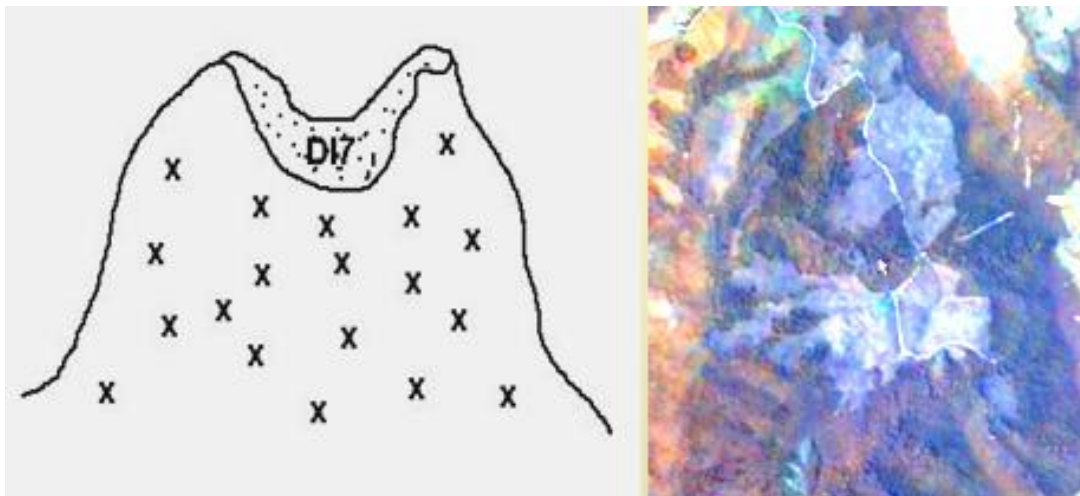
Las expresiones morfológicas de estas zonas de fallas se manifiestan, en el terreno por el cambio de pendiente abrupta o moderada a suave, valles agudos en "v" presencia de movimientos en masa. Aquí la degradación normal por interperismo es altamente favorecida por la acción mecánica de trituramiento asociado a los movimientos de la falla durante sus periodos de actividad.



**Figura 16.** Esquema e imagen de depósitos residuales lateríticos asociados a zonas de falla. Obsérvese la presencia de estas superficies de aplanamiento desarrollada por los suelos residuales lateríticos. Imagen Landsat TM bandas TM4, TM5, TM3 (R,G,B)

### 5.7. Morfología de lateritas asociadas a depresiones morfológicas de montaña (DI7).

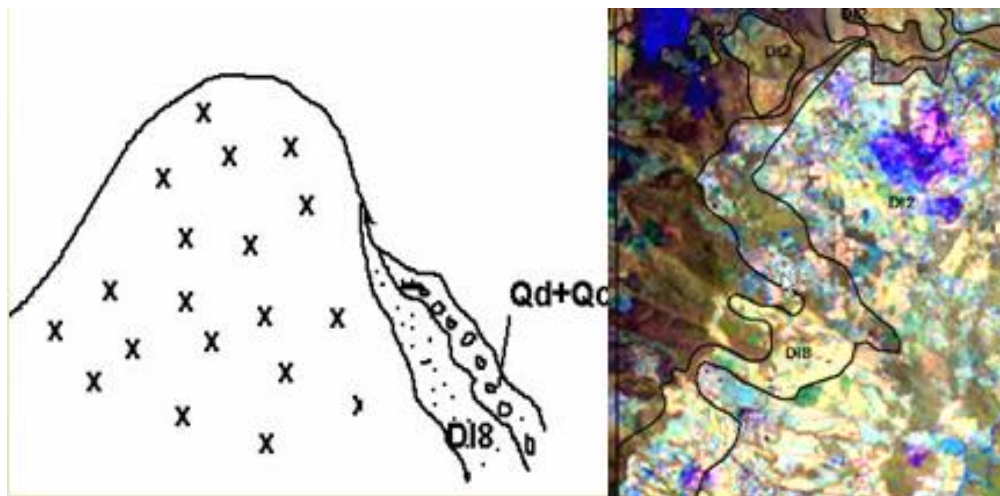
Se desarrollan en cimas de montaña semejando edificios volcánicos inactivos, en donde la roca sufre un alto proceso de alteración sin transporte de material. Figura 17.



**Figura 17.** Esquema e imagen mostrando depósitos residuales en depresiones morfológicas de cimas de montaña. Imagen Landsat TM bandas TM4, TM5, TM3 (R,G,B)

### 5.8. Morfología de lateritas asociadas a pie de laderas (D18).

Corresponden a morfologías desarrolladas como pie de laderas en cerros y/o montañas conformadas por rocas ultramáficas. Esta morfología se puede presentar, como laderas suavemente inclinadas contrastantes con la morfología abrupta de montaña o colinas bajas localizadas en la bases de estas montañas. Estas geoformas pueden contener superficialmente, depósitos de ladera como coluviones y derrubios enmascarando las lateritas. Figura 18.



**Figura 18.** Esquema e imagen mostrando lateritas asociadas a morfologías de pie de laderas. Imagen Landsat TM bandas TM4, TM5, TM3 (R,G,B)

## 6. DEFINICIÓN DE PROSPECTOS

La condición de prospecto se ha definido teniendo en cuenta la presencia de los siguientes indicadores o criterios:

- Desarrollo de laterita sobre roca ultramáfica
- Baja disección por drenaje



- Pendientes suaves
- Baja intervención de procesos y depósitos dinámicos
- Geomorfología de aplanamiento asociada a suelos residuales y/o lateríticos
- Extensión cartografiada a una escala mínima de 1:25.000

Teniendo en cuenta la extensión del prospecto se clasificaron en tres tipos o categorías así:

Tipo A  $\geq 0.9 \text{ km}^2$

Tipo B  $0.9 - 3 \text{ km}^2$

Tipo C  $\leq 0.3 \text{ km}^2$

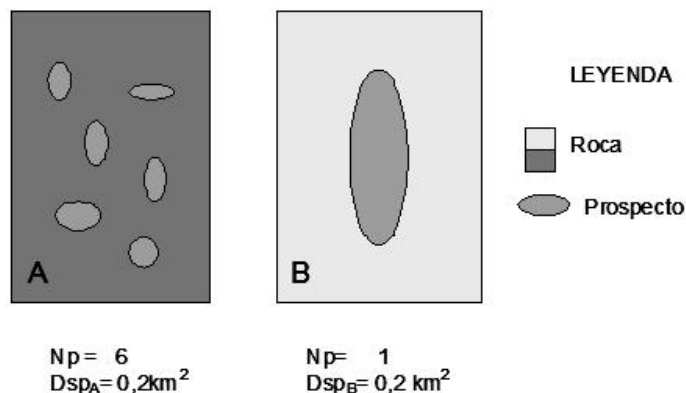
### 6.1. Valoración de prospectos

Para la valoración de los prospectos por zona potencial, se utilizan tres variables así:

- Número de Prospectos ( $N_p$ )
- Superficie acumulada de prospectos ( $S_p$ )
- Superficie acumulada de la roca fuente o roca ultramáfica ( $S_{um}$ )
- Con base en las relaciones de estas tres variables se establecen tres índices así:
- Índice por número de prospectos
- Índice por relación de densidad de superficie
- Índice del potencial de prospectos

$$IP = (D_{sp}/D_{np}) \times 100$$

El número de prospectos es una variable en la definición de su potencial, para clarificar este aspecto tomamos el siguiente ejemplo.



**Figura 19.** Esquema para valorar el número de prospectos en el potencial de los mismos.

En el esquema anterior hacemos un supuesto de dos zonas potenciales A y B, la zona A contiene 6 prospectos y una superficie acumulada de 0,2 km<sup>2</sup>, la zona B tiene un solo prospecto y tiene la misma superficie. La pregunta es si quiero definir cual de los dos prospectos tendría un mayor peso, la respuesta lógica sería el B, entonces se considerará esta variable para el análisis mediante la siguiente ecuación:

$$\text{INP} = \text{Sp}/\text{Np}$$

De donde:

**Inp**= Índice por número de prospectos

**Np**= Numero total de prospectos

**Sp**= Superficie total de prospectos

### **Paso 2. Índice por relación de densidad**

La densidad se calcula teniendo en cuenta la superficie acumulada de los prospectos sobre la superficie total de la roca fuente o roca ultramáfica

Para este cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{IDSP} = (\text{Sp}/\text{Sum}) * 100$$

De donde:

**IDSP**= Índice por densidad de superficie de prospectos

**Sp**= Superficie acumulada de los prospectos en la zona potencial

**Sum**= Superficie total de roca ultramáfica fuente en la zona potencial

### **Paso 3. Definición del índice de potencial de las zonas**

El índice del potencial de prospectos en las zonas de estudio, se obtiene mediante el producto de los dos índices anteriores así:

$$\text{IP} = (\text{Dsp}/\text{Dnp}) \times 100$$

De donde:

**IP**= Índice del potencial de prospectos en la zona potencial

**Isp**= Índice de densidad de superficie de prospectos

**Inp**= Índice de número de prospectos

### **Paso 4. Calificación de los prospectos**

Teniendo en cuenta la distribución de valores del Índice potencial de prospectos por zona potencial, se establecieron los siguientes intervalos y calificaciones de ponderación:

≤5	Bajo
5.1 - 10	Medio
10.1 – 15	Alto
≥15.1	Muy alto

## 7. RESULTADOS Y APLICACIONES

Un ejemplo de aplicación de esta metodología se realiza a continuación en la zona de Campamento, Antioquia

### 7.1. Localización Geográfica

La zona potencial de Campamento presenta una extensión de 89,26136 km<sup>2</sup> y se halla situada en el departamento de Antioquia entre los municipios Anorí al noroeste y Campamento al suroeste. Cartográficamente hace parte de la plancha 116.

### 7.2. Sensores remotos

Esta zona se presenta en la cobertura geográfica de las escenas Landsat definidas con el Path 9 Row 55. De estas imágenes se utilizaron subescenas de los años 1987, 1996 y 2000. Como imagen Spot pancromática, se utilizó la subventana de la escena 643-336 del año 2004. Para esta zona se elaboró un fotomosaico digital con resolución de 2 metros por píxel, Figura 20.

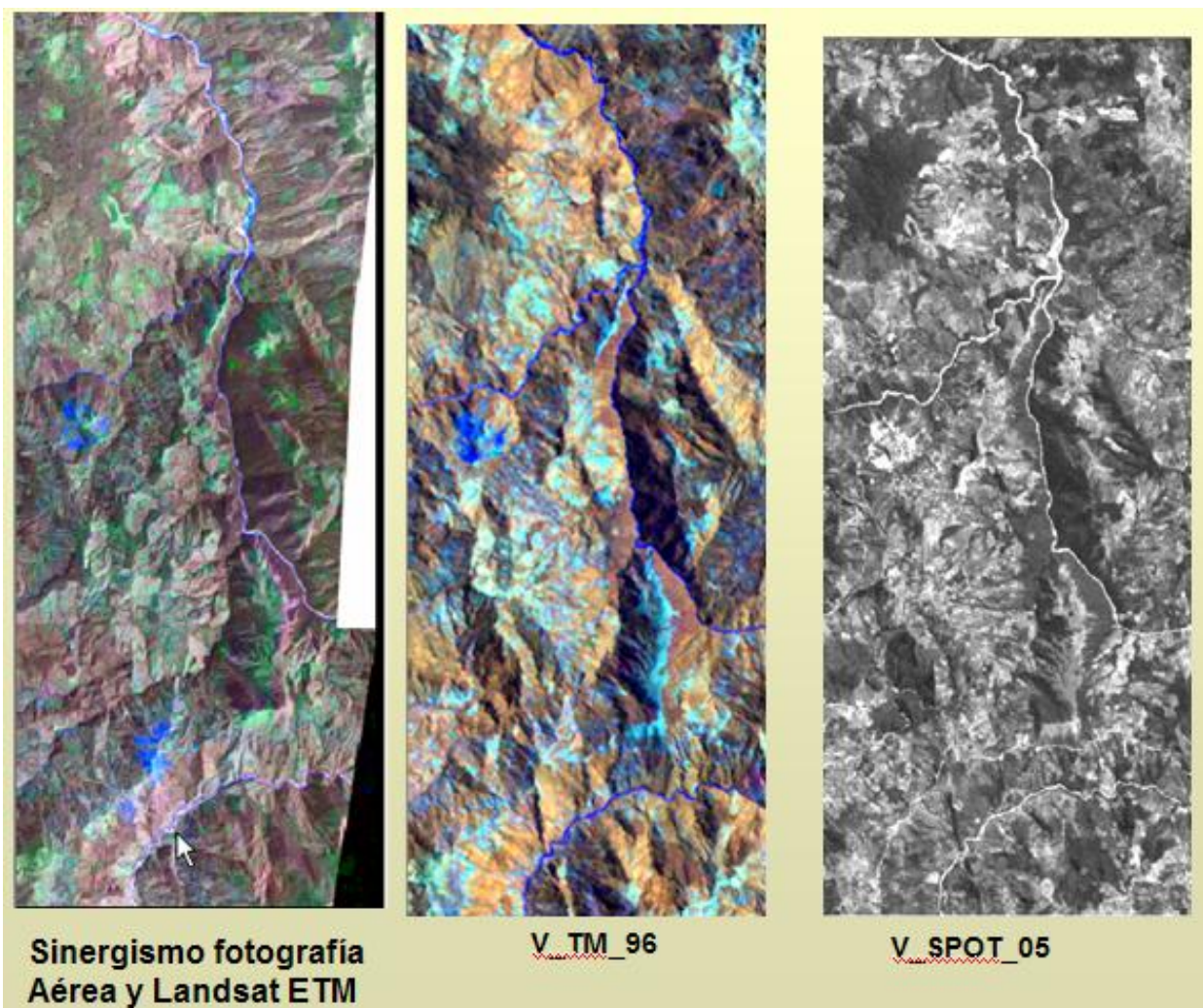


Figura 20. Ejemplos de imágenes y fotografías aéreas utilizadas en el análisis de prospectos de níquel en la región de Campamento, Antioquia.

### 7.3. Geología

Geológicamente la zona de Campamento, está referenciada con la plancha H8 Yarumal y H7 Ituango a escala 1:100.000, allí la unidad estratigráfica de está referenciada como Serpentinita (Ks), caracterizada por la presencia de cuerpos ultramáficos generalmente serpentinizados.

En este estudio, se redefinieron los límites de esta roca ultramáfica respecto a la cartografía de referencia. Se presenta en dos cuerpos uno predominante y continuo de forma alargada en dirección Sur - Norte con una superficie de 13,46 km<sup>2</sup> y otro individual de poca extensión (457 m<sup>2</sup>) ubicado al norte de este primero. El cuerpo ultramáfico cubre una superficie total acumulada de 13,92 km<sup>2</sup>

Estructuralmente se identificaron un total de 268 lineamientos estructurales, los cuales fueron clasificados en mayores y menores. Las fallas regionales se presentan en dirección SN y N15 W y los lineamientos menores definidos por fallas o fracturas transversales se orientan preferencialmente en dirección EW y NE. Figura 21

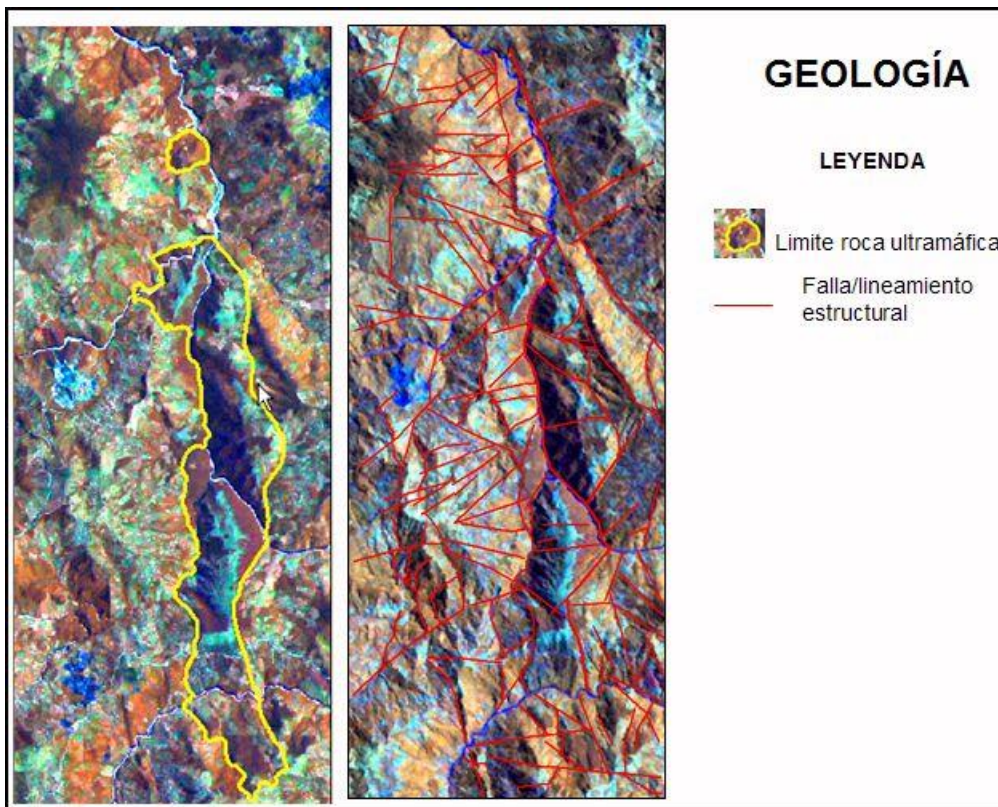


Figura 21. Marco geológico región de Campamento, Antioquia

### 7.4. Geomorfología

Geomorfológicamente el área de Campamento se caracteriza por desarrollar un relieve estructural de cerros con formas elongadas hacia el norte y noroeste, de laderas convexas y pendientes moderadas y un relieve denudacional formado por cerros y colinas de forma semicircular.

Las geoformas o superficies de aplanamiento definidas en esta zona corresponden en orden de importancia a: filos y cimas de montaña (D11) y morfologías asociadas a relieves bajos colinados (D14), laderas homoclinales rectas (D15), Altiplanos (D12) y morfologías asociadas a zonas de falla (D16). Figura 22

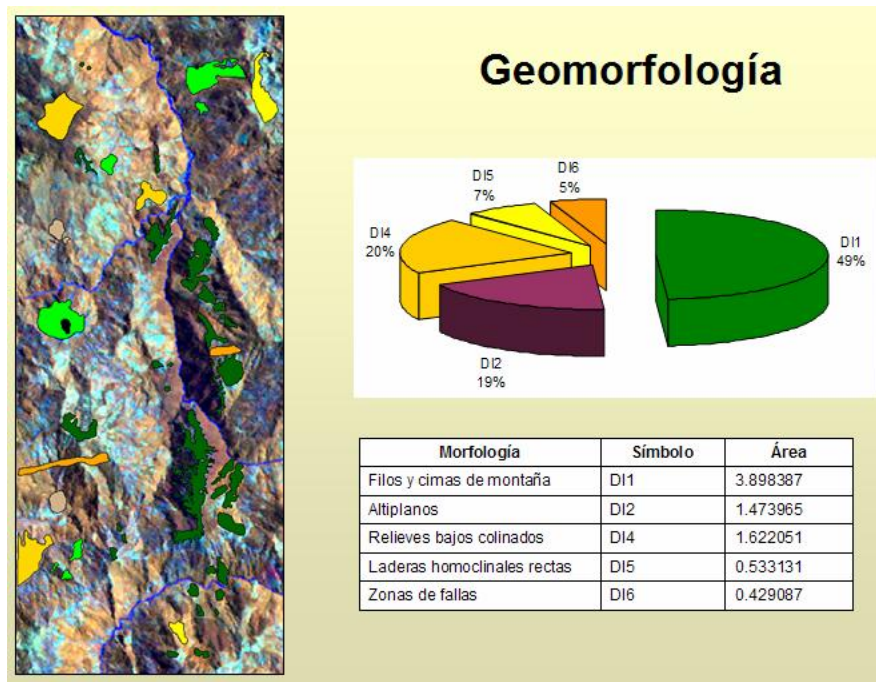


Figura 22. Geomorfología de la región de Campamento, Antioquia

### 7.5. Prospectos

En el área de campamento, se determinaron 22 prospectos con una superficie total acumulable de 2,66 km<sup>2</sup>, de los cuales el 38% equivalentes a una superficie de 1 km<sup>2</sup> corresponden al tipo A, el 47% (1,2568 km<sup>2</sup>) corresponden a prospectos tipo C y el 15% con 0,4 km<sup>2</sup> corresponden a tipo B. Esta zona, se ha calificado en la categoría de Bajo Potencial de prospecto de Níquel. Figura 23.

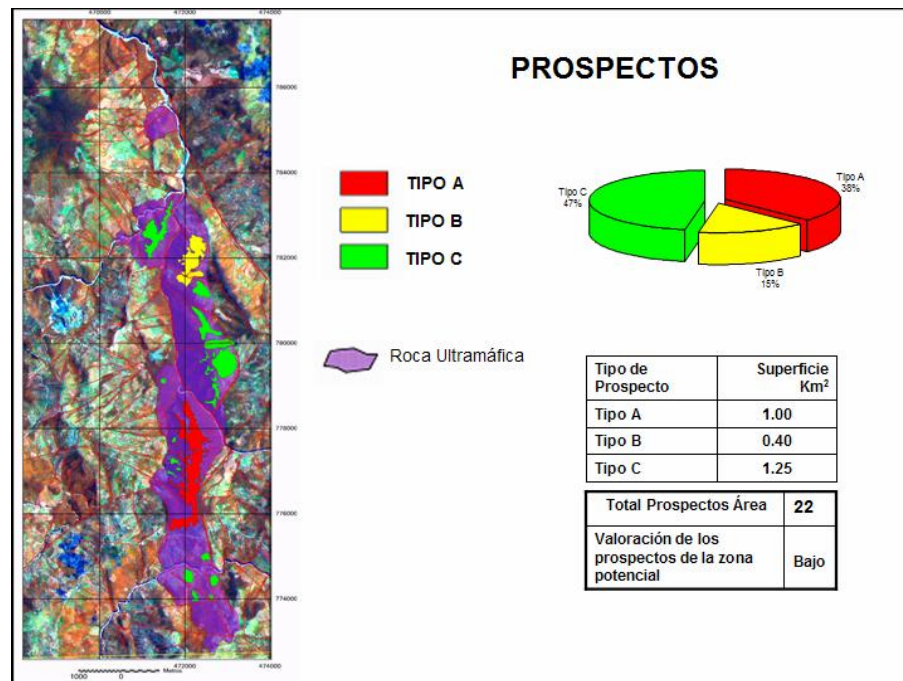


Figura 23. Prospectos de Níquel en la región de Campamento, Antioquia

## 8. CONCLUSIONES

Como resultado de este trabajo investigativo se pueden extraer las siguientes conclusiones y logros:

- Se ha puesto en evidencia la utilidad de los sensores remotos, en los estudios de prospección de recursos minerales como Hierro y Níquel.
- El estudio ha establecido métodos de procesamiento digital de imágenes, que permiten resaltar elementos de interés para la prospección de los minerales.
- La identificación e implementación de indicadores geológicos y geomorfológicos, combinados con técnicas de procesamiento digital de imágenes, ha permitido establecer criterios confiables para el análisis espacial de variables y la definición de prospectos.
- Mediante el realce espectral de imágenes Landsat, se determinaron valores espectrales característicos para rocas ultramáficas y posibles depósitos lateríticos.
- Se ha determinado que la identificación, clasificación y cartografía de geoformas de superficies de aplanamiento específicas, relacionadas a suelos residuales de interés, permite establecer con mayor precisión relaciones espaciales entre la geomorfología y los posibles depósitos lateríticos.
- La implementación de una metodología sencilla y fácil de validar y aplicar, ha permitido definir y clasificar con mayor precisión los prospectos, base para la programación de las fases de campo posteriores.
- La implementación de un sistema de información georeferenciado, en las que se combinan imágenes raster y coberturas vectoriales, permitieron una alta precisión en las interpretaciones digitales con múltiples planos.
- La implementación de un SIG por zona potencial con los resultados de los estudios, facilita su uso por parte de los profesionales CMSA para su análisis e impresión en los trabajos de control de campo.
- De las 48 zonas de estudio con una superficie de 3623,27 km<sup>2</sup>, se determinaron 416 prospectos que cubren una superficie acumulada de 149,17 km<sup>2</sup>.

Como resultado de este trabajo se establece, el potencial de uso de los sensores remotos, en fases iniciales de exploración de recursos minerales lateríticos como Níquel, permitiendo obtener valoraciones relativas de prospectos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen a Cerro Matoso S.A., por el desarrollo de este estudio investigativo, el apoyo logístico brindado durante el estudio y autorizar esta publicación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Mejía, M. y Durango, R., 1982. Geología de las lateritas Niquelíferas de Cerro Matoso S.A. Boletín de Geología No 29, Vol. 15. pp. 99 - 116.
- Ortiz, B. F., 2004. Guías para la localización de metales preciosos en ofiolitas colombianas. Informe de avance proyecto cyted XIII.1. Ofiolitas: características mineralógicas y petrográficas del yacimiento de níquel de Cerro Matoso. Dyna, Año 71, No. 142, pp. 11-23. Medellín, ISSN 0012-7353
- Vargas, G., 1998. Geología y prospección de oro por sensores remotos en el sector Sotomayor - La allanada, Nariño. Latin GolG. 1998. Informe técnico.

- Vargas, G., 2006. Evaluación de áreas potenciales de níquel en Colombia para la determinación de prospectos a partir de sensores remotos. Contrato 45000. Cerro Matoso S.A. Informe técnico 220 pag.
- Vargas, G., 2008a. Sensores remotos, cartografía geológica y estructural para la prospección de cobre, en el área de San Diego, Cesar.
- Vargas, G., 2008b. Sensores remotos y cartografía geológica y estructural para la prospección de oro, en las áreas de Dominical y Piedrasentada. Proyecto socialización y delimitación de prospectos de las áreas Piedra sentada y dominical, Departamento del Cauca Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Dpto. de Geociencias - CARBOANDES.
- Vargas, G., 2008c. Cartografía e historia geológica de la alta Guajira, implicaciones en la búsqueda de recursos minerales, Universidad Nacional de Colombia, Dpto. de Geociencias - INGEOMINAS.
- Vargas, G., 2008d. Geología para la prospección de uranio en el área de Berlín, Colombia, a partir de sensores remotos. Informe técnico. SRK Exploración (Mega Uranium).
- Vargas, G., 2008e. Cartografía geológica y estructural para la prospección de oro, en las áreas de San Fernando y el Cairo (Tolima) a partir de sensores remotos. Informe técnico. MININCOL.

