

TELEDETECCIÓN SATELITAL ÓPTICA EN EL SEGUIMIENTO DE LAS ACTIVIDADES MINERAS EN MADRE DE DIOS

Katherine GONZALES, Juan CASAS, Hugo ZARATE, Daniela RIVERA e Ítalo RODRIGUEZ.
INGEMMET, Av. Canadá 1470 San Borja, Lima.
kgonzales@ingemmet.gob.pe

RESUMEN

La minería aurífera de suelos aluviales en Madre de Dios, en las áreas comprendidas en las sub-cuencas de los ríos Madre de Dios, Inambari, y Tambopata, se ha incrementado rápidamente en los últimos años debido al incremento del precio del oro. La llamada pequeña minería o minería artesanal, se ha convertido en la principal causa de degradación del medio ambiente debido a: la remoción de grandes volúmenes de materiales, la contaminación (por mercurio, hidrocarburos y otros desechos), la deforestación masiva, la compactación del suelo, etc.

Presentamos en este trabajo los resultados de una evaluación temporal, usando técnicas de Teledetección satelital con datos LANDSAT-TM para el periodo 1975-2011, que permiten cuantificar la expansión del área afectada por la actividad minera y poner en evidencia el crecimiento casi constante que esta actividad ha tenido en los últimos 4 años.

AREA DE INTERÉS

La zona aurífera de Madre de Dios comprende las cuencas y subcuencas de los ríos Madre de Dios, Inambari, Colorado, Tambopata y Malinowski, sin embargo, el presente estudio se focaliza en la intercuenca Alto Madre de Dios, cuenca Inambari y cuenca Tambopata. El área de estudio se divide en tres zonas de interés, debido a la magnitud de las actividades extractivas mineras observadas en las imágenes satelitales más recientes. Estas tres áreas se denominan: Madre de Dios, Huepetuhe e Inambari, Figura N° 1.

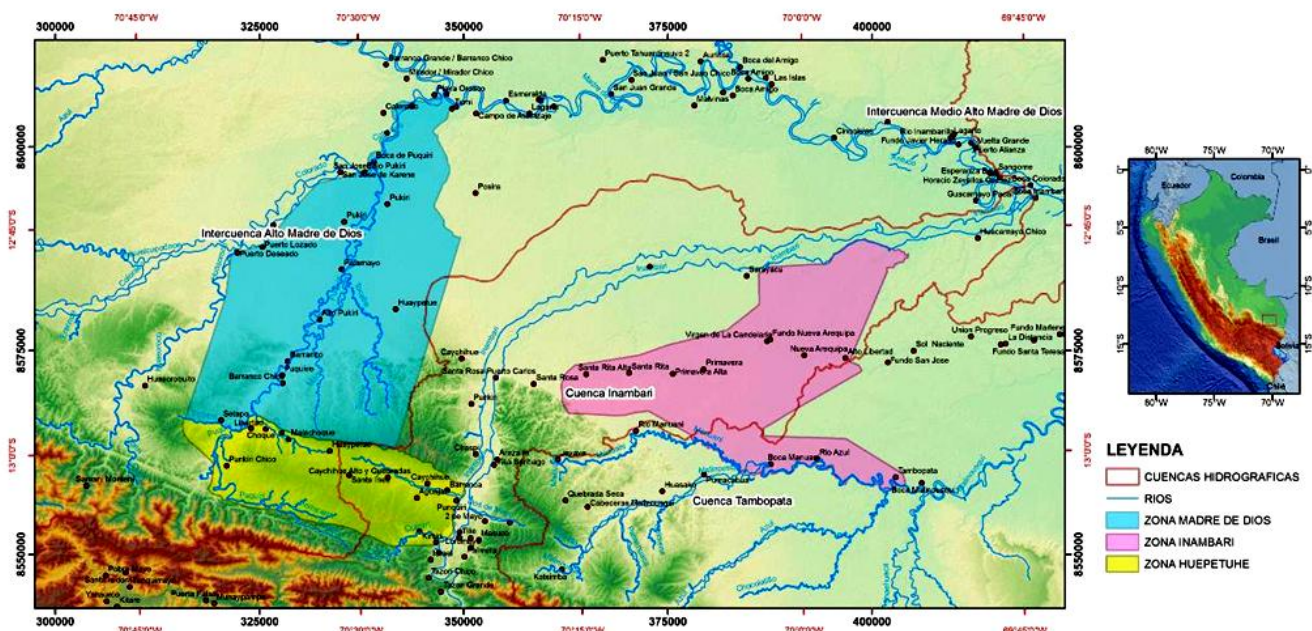


Figura N° 1. Mapa de ubicación de las áreas de interés: Madre de Dios, Huepetuhe e Inambari

CONTEXTO GEOLÓGICO

La geología de las zonas de estudio, denominadas Huetupe, Madre de Dios, Inambari, comienza en el Cretáceo. En el Terciario prevalecieron las condiciones de deposición continental de la cuenca Oriental, depositándose la secuencia del Grupo Huayabamba, constituida por rocas sedimentarias de color rojizo. En el Cretáceo, la sedimentación en aguas someras recibe la influencia de materiales traídos por los ríos, desde la Cordillera Oriental (rocas paleozoicas). En el Cuaternario Reciente, los ríos Inambari y Madre de Dios depositan sedimentos areno-limosos y gravas inconsolidadas a semi-consolidadas con presencia de óxidos de hierro, siendo los niveles de las gravas donde se encuentra el oro aluvial (INGEMMET, 1996). En las llanuras, los ríos son entrenzados y meandriformes, con sedimentos depositados como “pointbars”. Las areniscas y limos de los meandros tienen buenos contenidos auríferos, tal como sucede a lo largo de los ríos Colorado, Inambari, Madre de Dios y Tambopata, especialmente en las partes bajas, donde la agradación fluvial es activa y donde la carga de los ríos - constituida de arenas, limos y arcillas - se asienta: preferentemente los más finos en las áreas inundables y los menos finos a lo largo del canal. Los depósitos de placer son enriquecidos progresivamente por una sucesión de acciones e interacciones de la corriente, observándose dos tipos de placeres (INGEMMET, 1996) en el área de estudio:

Placeres Eluviales.- Formados por la erosión de las exposiciones rocosas de la Cordillera Oriental y la consecuente acumulación de gruesas capas de sedimentos en el piedemonte. Constituye la fuente principal de oro, pudiendo ser retrabajada para dar paso a la formación de placeres aluviales en la Llanura de Madre de Dios.

Placeres Aluviales.- Este tipo de depósitos ocurre en los sedimentos aluviales de la Llanura de Madre de Dios. Se distingue dos clases:

- a) Depósitos de playas y barras.- Los placeres más ricos, se ubican en los “pointbars”, más específicamente, en la cabeza de éstos, así como en las playas laterales. Son trabajados anualmente luego de cada periodo de crecida del río, (INGEMMET, 1996).
- b) Depósitos de terrazas.- Resultan de la removilización y redepositación de los sedimentos que originalmente contenían concentraciones auríferas de importancia. Los sectores más ricos representan usualmente porciones de lechos de antiguas corrientes.

CARTOGRAFIA DE AREAS DE ACTIVIDAD MINERA

Se analizó 09 imágenes satelitales LANDSAT “path/row”: 03/069, (Cuadro N°1), para la cartografía de las áreas correspondientes a la actividad minera, para el periodo 1975-2011. Las imágenes satelitales fueron seleccionadas y descargadas del GLOVIS (Global Visualization Viewer, <http://glovis.usgs.gov/>) del Servicio Geológico de los Estados Unidos-USGS, en función de la cobertura nubosa (0-5% sobre el área de interés) y fechas de toma que no coincidiesen con el periodo máximo de lluvias (noviembre-marzo). Las imágenes seleccionadas corresponden al periodo julio-setiembre, época de niveles bajos del caudal de los ríos.

N°	Satélite	Sensor	Fechas de adquisición	Cantidad
1	LANDSAT 2	MSS	29/07/1975	1
2	LANDSAT 5	TM	12/07/1986, 23/07/1996, 14/08/2004 23/08/2007, 25/08/2008, 28/08/2009, 16/09/2010, 03/09/2011.	8

Cuadro N° 1. Imágenes satelitales usadas para cartografía de áreas de actividad minera en el área de estudio.

Procesamiento de las imágenes satelitales:

Las imágenes fueron corregidas atmosférica y geométricamente (ENVI, 1998), de manera que todas las imágenes sean perfectamente superpuestas entre ellas, para lo cual se usó el software ENVI (© 2012, Exelis Visual Information Solutions) y para el cálculo de las áreas de actividad minera se usó el software ARCGIS (© ESRI).

Clasificación de coberturas:

Para la clasificación de las coberturas, se usó el método de clasificación supervisada “Spectral Angle Mapper”, que se basa en el cálculo directo del ángulo espectral entre el vector que representa el espectro de la clase buscada (espectros de referencia) y el vector pixel donde los componentes son los valores digitales de las diferentes bandas de la imagen calibrada en reflectancia (ENVI, 1998). Los espectros de referencia o “End-members” seleccionados para cada clase de cobertura fueron seleccionados y extraídos de imágenes de alta resolución espacial (~1XSm aprox., desde Google Earth) mediante regiones de interés (ROI). Se seleccionaron varios ROI (Ground Truth Roi) por cada clase o cobertura identificada (Cuadro N° 2), y el espectro de referencia resultante es el promedio de todos los pixeles componentes de dichos ROI, para cada clase (Figura N° 2).

Clases iniciales identificadas para la clasificación.	a. Bosque b. Áreas reforestadas, áreas agrícolas o similares. c. Río d. Río con turbidez elevada e. Empozamiento de agua y lodos por minería f. Áreas de minería (remoción de gravas). g. Áreas de minería en proceso de recuperación h. Áreas de minería en proceso de recuperación (presencia vegetación) i. Playas
---	---

Cuadro N° 2. Clases o coberturas identificadas en las imágenes de alta resolución.

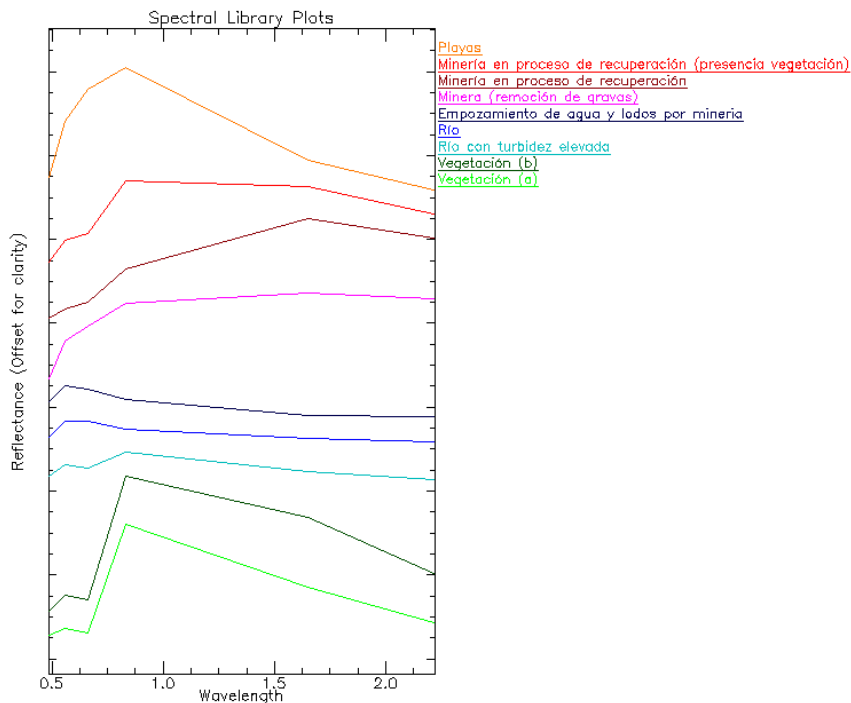


Figura N° 2. Espectro de referencia (o “End-members”) obtenidos de las imágenes LANDSAT, usados para la clasificación de las imágenes LANDSAT-5 TM.

Algunos aspectos en la clasificación:

- Las áreas mineras, correspondientes a la remoción de material (gravas), muestran un gran contraste con respecto a la vegetación y agua de los ríos, sin embargo, suelen confundirse con algunos elementos de los ríos (como playas), por ello se usó máscaras para separar la vegetación y el agua de los ríos.
- Algunas áreas mineras a lo largo del tiempo han ido recuperándose y muestran presencia de vegetación en las imágenes más recientes. Estas áreas suelen confundirse con áreas de actividades agrícolas presentes alrededor de las zonas mineras.

La clasificación resultante fue evaluada mediante una matriz de confusión y el índice kappa (Congalton, 1991). El índice kappa mide el acuerdo entre el mapa resultante con la realidad. Se estimó en promedio de las clasificaciones de las 8 imágenes LANDSAT 5, una precisión global de 81% y un índice kappa de 0.78. La imagen LANDSAT 2 fue clasificada usando el método de clasificación no supervisada ISODATA (ENVI, 1998).

La Figura N° 3, muestra un ejemplo de la clasificación con el método SAM para la imagen LANDSAT TM de fecha (23/08/2007). Las clases g y h han sido combinadas para una mejor visualización.

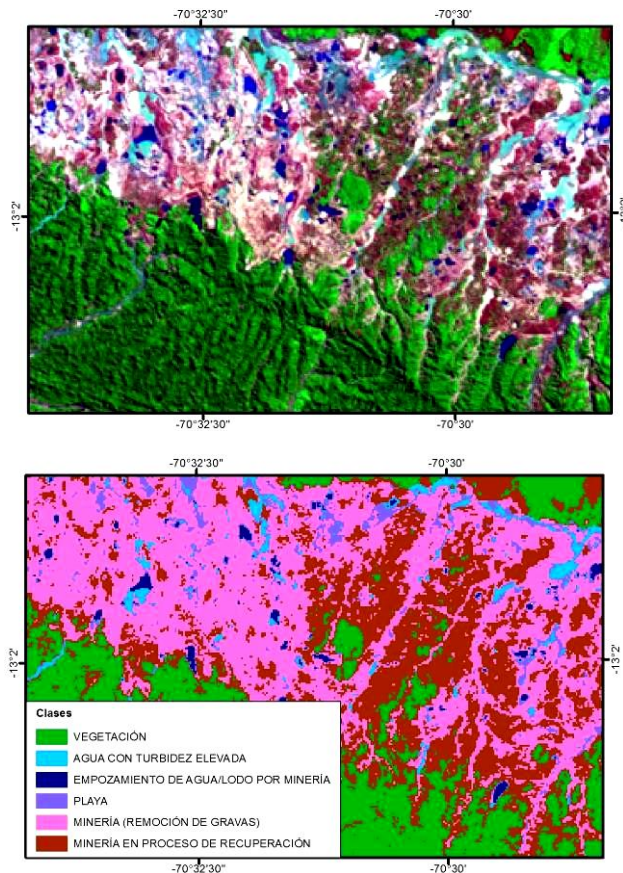


Figura N° 3. Izquierda: Composición LANDSAT RGB: 742 del área de Huepetuhe, (imagen LANDSAT de fecha 23/08/2007); Derecha: Clasificación de la imagen LANDSAT (de fecha 23/08/2007) usando método de clasificación supervisada SAM.



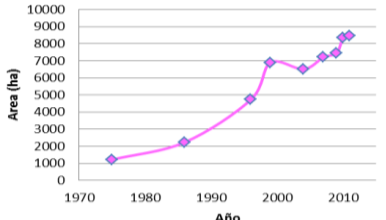


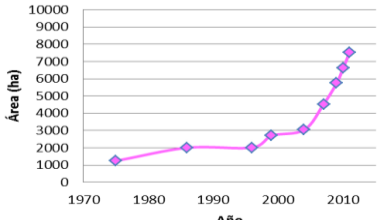
Post-clasificación y estimación de áreas afectadas por la actividad minera:

Para fines de estimar las áreas correspondientes a la actividad minera, se realizó una agrupación de clases de la siguiente manera:

Clases finales para estimación de áreas de actividad minera.	Grupo vegetación: <ul style="list-style-type: none"> • Bosque, • Áreas agrícolas. 	Grupo Agua: <ul style="list-style-type: none"> • Ríos • Ríos con turbidez elevada, • Empozamiento de agua y lodos de minería 	Grupo Minería <ul style="list-style-type: none"> • Áreas mineras • Áreas mineras en recuperación • Playas
--	---	---	--

EVALUACIÓN MULTI-TEMPORAL DE LAS ÁREAS AFECTADAS POR ACTIVIDADES MINERAS EXTRACTIVAS

Las clasificaciones de coberturas aplicadas a las imágenes satelitales LANDSAT permitieron estimar el área afectada por las actividades mineras (según grupos mencionados anteriormente) para cada año de las imágenes disponibles, y evidenciar el incremento casi constante de las áreas de minería en Madre de Dios, en los últimos 7 años, Figura N° 3, y que tiene relación directa con el precio internacional del oro (www.goldprice.org), Figura 4.

Imagen LANDSAT RGB:674 (Año: 1975)	Imagen LANDSAT RGB:742 (Año: 2011)	Área afectada por Minería (Ha)																
HUEPETUHE																		
		<p style="text-align: center;">Huepetuhe</p>  <table border="1"> <caption>Data for Huepetuhe Mining Area (Ha)</caption> <thead> <tr><th>Año</th><th>Área (ha)</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1975</td><td>1000</td></tr> <tr><td>1985</td><td>2000</td></tr> <tr><td>1995</td><td>4500</td></tr> <tr><td>2000</td><td>7000</td></tr> <tr><td>2005</td><td>6500</td></tr> <tr><td>2010</td><td>7500</td></tr> <tr><td>2011</td><td>8500</td></tr> </tbody> </table>	Año	Área (ha)	1975	1000	1985	2000	1995	4500	2000	7000	2005	6500	2010	7500	2011	8500
Año	Área (ha)																	
1975	1000																	
1985	2000																	
1995	4500																	
2000	7000																	
2005	6500																	
2010	7500																	
2011	8500																	
MADRE DE DIOS																		
		<p style="text-align: center;">Madre de Dios</p>  <table border="1"> <caption>Data for Madre de Dios Mining Area (Ha)</caption> <thead> <tr><th>Año</th><th>Área (ha)</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1975</td><td>1000</td></tr> <tr><td>1985</td><td>2000</td></tr> <tr><td>1995</td><td>2000</td></tr> <tr><td>2000</td><td>3000</td></tr> <tr><td>2005</td><td>3500</td></tr> <tr><td>2010</td><td>6500</td></tr> <tr><td>2011</td><td>8000</td></tr> </tbody> </table>	Año	Área (ha)	1975	1000	1985	2000	1995	2000	2000	3000	2005	3500	2010	6500	2011	8000
Año	Área (ha)																	
1975	1000																	
1985	2000																	
1995	2000																	
2000	3000																	
2005	3500																	
2010	6500																	
2011	8000																	
INAMBARI																		

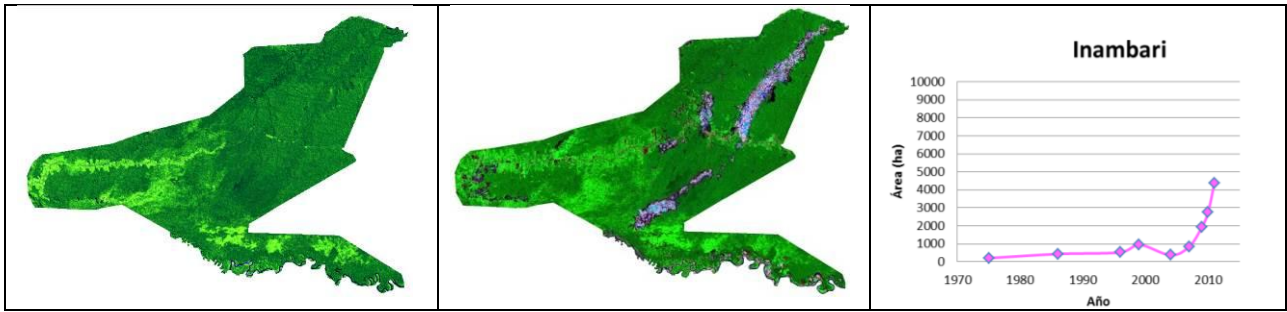


Figura N° 3. Evaluación multi- temporal del crecimiento de las áreas afectadas por la actividad minera en las tres áreas de estudio de la Región Madre de Dios.

- Zona Huepetuhe: Cubre un área de 31,900 ha. Esta zona ha sido intensamente explotada desde antes del año 1986. La información extraída de las imágenes satelitales muestra el incremento casi constante del área de expansión de las labores mineras. Se observa en esta área un incremento de las áreas verdes, por lo que podría indicar que las labores de extracción y explotación han disminuído y los suelos van recuperándose. Se estima que el área afectada es 8,500 ha hasta el año 2011 aproximadamente, y registra una velocidad de crecimiento del area de 315 ha/año desde el 2007 hasta el 2011, Figura N°3.
- Zona Madre de Dios: Cubre un área de 84,150 ha. En esta zona, las labores mineras comienzan a hacerse evidentes en el año 2004. Sin embargo, en la imagen del año 1999, se observa que el río Pukiri recibe fuerte influencia de los materiales (sedimentos) de la zona de Huepetuhe, que llegan a modificar su cauce, especialmente incrementando las zonas de playa. A partir del 2004, el incremento en el área de labores mineras ha sido constante, registrando una velocidad de crecimiento del área afectada por actividades mineras de 750 ha/año en los últimos 7 años . Se estima que el área afectada es de 7,500 ha, aproximadamente hasta el año 2011, Figura N°3.
- Zona Inambari: Cubre un área de 55,930 ha. Esta zona comenzó a ser intensamente explotada a partir del año 2007. La explotación ha sido más tardía, sin embargo, es la zona que en los últimos 7 años ha registrado una tasa de crecimiento de las actividades mineras más alta con respecto a las zonas Huepetuhe y Madre de Dios, registrando una velocidad de 890 ha/año. Se estima que el área afectada es de 4,400 ha hasta el año 2011 aproximadamente, Figura N°3.

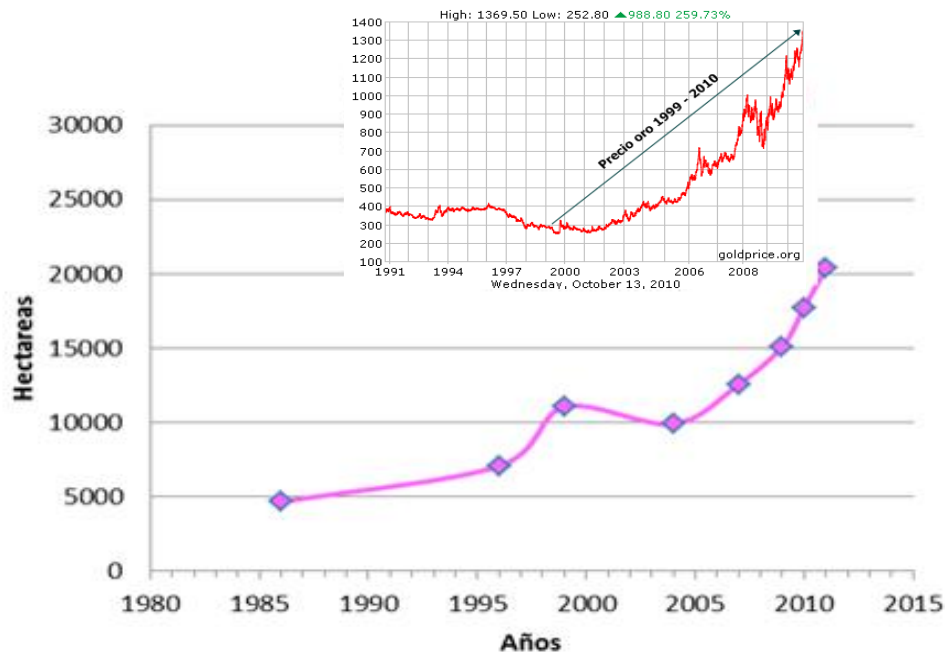


Figura N°4. Área total afectada por la actividad minera (periodo 1985-2011) en las tres zonas de interés de la Región de Madre de Dios

La Figura 4 muestra el área total ocupada por las actividades mineras para las tres zonas estudiadas y una comparación con la variación internacional del precio del oro.

CONCLUSIONES

- La Teledetección satelital óptica LANDSAT permite hacer una evaluación multi-temporal del avance de las actividades mineras en la zona aurífera de la Región Madre de Dios para el periodo 1975-2011, así como hacer estimaciones de las áreas afectadas por dichas actividades.
- La zona de Inambari, es la zona que ha mostrado la mayor velocidad de expansión de las actividades mineras en los últimos 4 años, con respecto a Madre de Dios y Huepetuhe.

PERSPECTIVA

- Como parte de las perspectivas de este trabajo está el analizar los resultados en base a otras variables como el catastro, la legislación pasada y presente, e información sobre las leyes de oro en los depósitos, que puedan estar relacionados a la expansión y velocidad de expansión en las tres zonas de interés.

REFERENCIAS

- Congalton, R. G. (1991), A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sens. Environ.* 37:35–46.
- ENVI (1998). ENVI Programmer's Guide, 1998. Research System, Inc., 930pp.
- INGEMMET, 1996; Geología de los cuadrángulos de Puerto Luz, Colorado, Laberinto, Puerto Maldonado, Quincemil, Masuco, Astillero y Tambopata (hojas: 26-u, 26-v, 26-x, 26-y, 27-u, 27-v, 27-x, 27-y), Boletín. Serie A: Carta Geológica Nacional; Sector Energía y Minas, 189 pp.
- www.goldprice.org