

METODOLOGIA APLICADA PARA EL ANÁLISIS DE DEFORESTACIÓN

El principio básico de la percepción remota radica en que los diversos objetos de interés (vegetación, suelo, agua, etc.) reflejan, dispersan o emiten cantidades diferenciales de radiación electromagnética, la diferencia en estos niveles de radiaciones registradas por el sensor es lo que permite distinguir las diferencias entre los objetos en las imágenes generadas (Mackay L., 2005).

1

CONSIDERACIONES CONCEPTUALES Y METODOLÓGICAS INICIALES

SELECCIÓN DE LOS RECURSOS Y TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA

De acuerdo con los propósitos de escala establecidos para este ejercicio y la disponibilidad de imágenes de sensores remotos aplicables a estudios de mapeo de coberturas de la Tierra a escala nacional fina, se optó por el uso de imágenes de media resolución espacial, media resolución espectral y radiométrica. Las imágenes del programa LANDSAT (sensores TM y ETM+) fueron seleccionadas como el insumo de teledetección para la generación de información sobre deforestación histórica.

Respecto de las técnicas de procesamiento digital implementadas en este ejercicio, se aplica una metodología semi-automatizada con ajustes a criterio de intérprete para la generación de los mapas de cobertura Bosque/No Bosque.

Los criterios contemplados para la selección de las imágenes incluyen la disponibilidad y accesibilidad de las imágenes Landsat (TM y ETM+) en los diferentes repositorios de datos, los cuales generalmente son de libre distribución. Los antecedentes del uso de este tipo de imágenes en el país son amplios (PROCLIM, MINAM, etc.), estableciendo un adecuado nivel de experiencia en el manejo de estos conjuntos de datos, y así mismo permitiendo la recopilación de conjuntos homogéneos para algunos periodos de tiempo.

Los principales criterios para su selección son:

1. Porcentaje con cobertura de nubosidad. Se refiere al porcentaje de área de la imagen ocupada por coberturas de nubes o sombras de nube. Corresponde a un valor entre 0 y 100% asignado por USGS. Para este ejercicio se prefieren imágenes con coberturas de nubes menores al 20%. Sin embargo, de acuerdo a las particularidades del área analizada, la localización de las áreas con nubes y la disponibilidad de imágenes se podrán utilizar imagen hasta con el 50%.

2. Calidad. Está referido a un indicador de la calidad técnica de los datos (presencia de errores radiométricos, efectos nocivos, etc.). Corresponde a un valor entre 0 y 9 asignado por USGS. Se prefieren imágenes con calidades mayores o iguales a 7.
3. Fecha. Se refiere a la fecha de adquisición de las imágenes a utilizar. Se prefiere usar imágenes con la menor diferencia temporal posible, y de acuerdo a disponibilidad para cada temporada climática (Época seca - Época húmeda).

AREA DE TRABAJO

El Parque Nacional Cordillera Azul - PNCAZ se ubica entre los límites de San Martín, Loreto, Huánuco y Ucayali y tiene una superficie de 1,353,190.85 ha.

ESPECIFICACIONES DE IMAGENES LANDSAT

Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). El ETM+ es un sensor multiespectral radiométrico a bordo del satélite Landsat 7. Este sensor ha adquirido información casi ininterrumpida desde Julio de 1999 con un periodo de revisita de 16 días.

El 31 de Mayo de 2003 ocurrió una falla de un instrumento dando como resultado que todas las escenas de Landsat 7 adquiridas desde el 14 de Julio de ese año hayan sido colectadas en modo "SLC-off".

El sensor ETM+ provee imágenes con 8 bandas espectrales. La resolución espacial es de 30 metros en las bandas visibles e infrarroja cercana (bandas 1-5 y 7). La resolución de la banda pancromática (banda 8) es de 15 metros, y la banda infrarroja termal (banda 6) es de 60 metros. El tamaño aproximado de la escena es de 170 x 183 kilómetros.

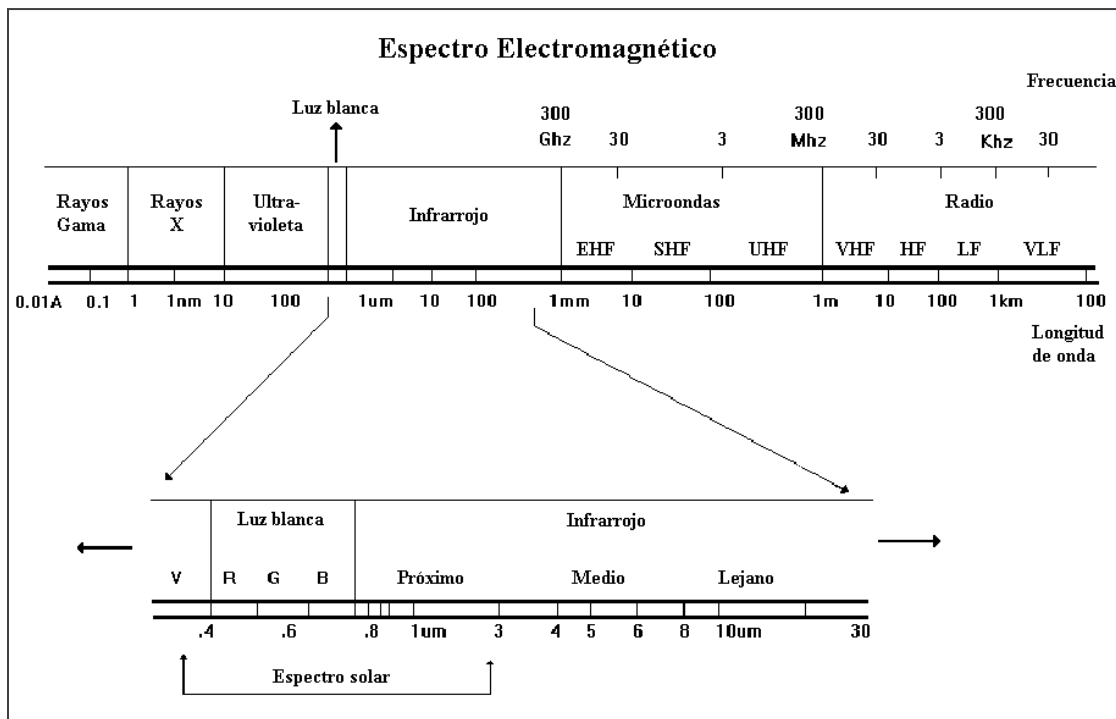
El satélite Landsat 5 fue puesto en órbita el 1° de marzo de 1984 portando el sensor TM (Mapeador Temático) que opera en siete bandas espectrales diferentes. Estas bandas fueron elegidas especialmente para el monitoreo de vegetación a excepción de la banda 7 que se agregó para aplicaciones geológicas.

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

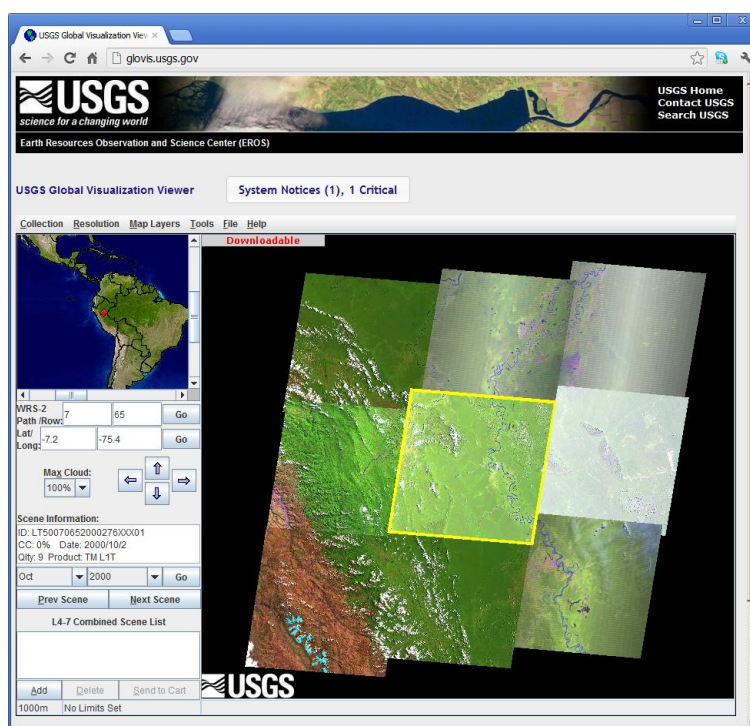
diferenciar tipos de rocas y, al igual que la banda 1, para detectar la presencia o no de limonita.

- 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.



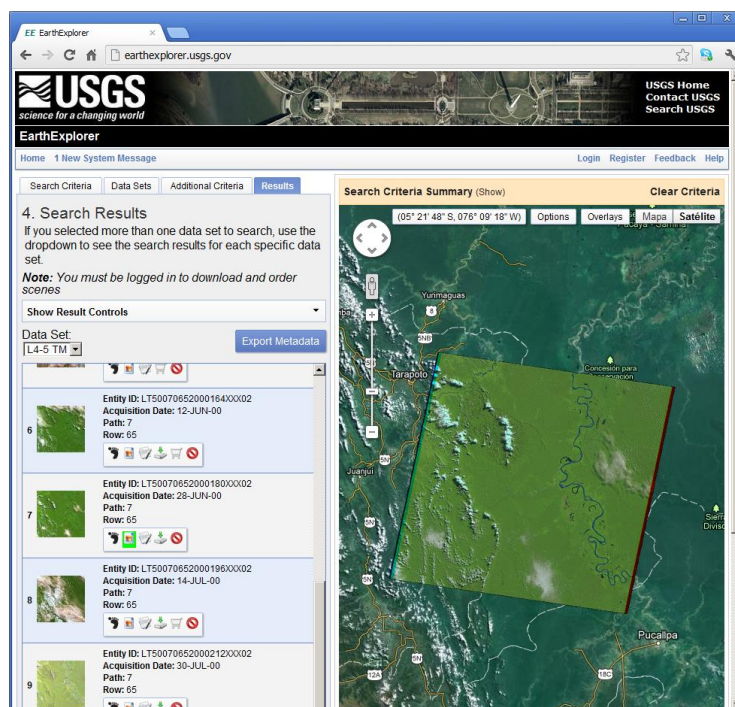
REPOSITORIOS DE IMÁGENES

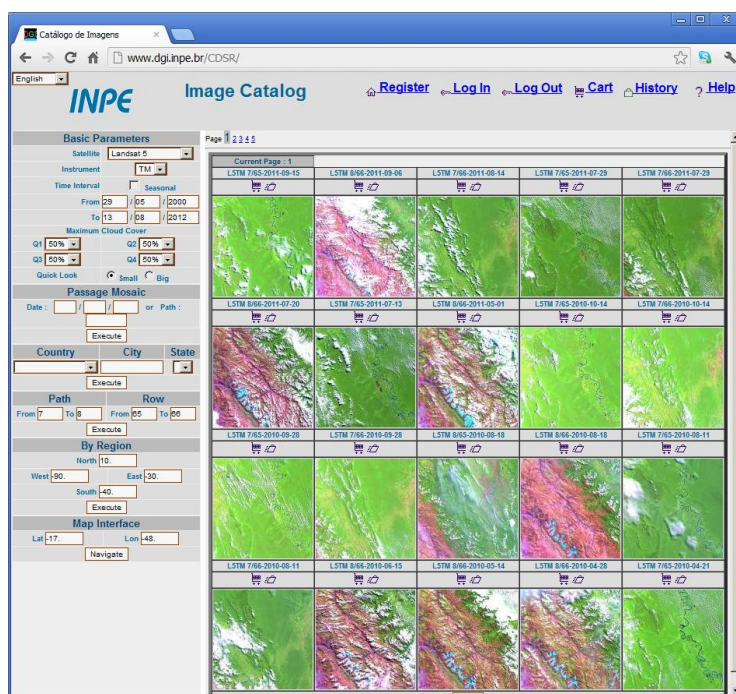
USGS GLOBAL VISUALIZATION VIEWER – GLOVIS (<http://glovis.usgs.gov/>)



4

EARTH EXPLORER (<http://earthexplorer.usgs.gov/>)





COBERTURA Y USO DE LA TIERRA

Para el análisis se necesita identificar dos Categorías principalmente, área de Bosque y No Bosque, pero para cubrir el resto de cuerpos que pueden ser identificados en la imagen, se adicionaron otras clases mas como cuerpos de agua, nubes, sombras y arenas/playas. Asignándole códigos para su fácil manejo en el proceso de clasificación digital.

Para bosque se considera toda formación vegetal que no presente alteración alguna por actividad antrópica.

La clasificación que se empleo en el trabajo es la siguiente:

Clase de cobertura	Código
No bosque	1
Bosque	2
Agua	3
Nube	4
Sombra	5
Playas	6

CRITERIOS DE INTERPRETACIÓN VISUAL DE IMÁGENES

Estos criterios nos permiten discriminar cambios en elementos de la imagen que si bien presentan un comportamiento espectral similar tienen en realidad un significado temático diferente. Estos son:

Forma: las características totales del límite de un objeto junto con su tamaño permiten que muchos objetos sean reconocidos

Tono: Cada cubierta de usos/ocupación de la tierra tiene determinados tonos según la banda espectral del satélite que se use.

Color: La composición de distintas bandas espectrales de una misma escena produce el aumento de la información disponible para poder interpretar.

Textura: Suavidad o rugosidad de determinadas áreas de la imagen, debido al tamaño de los objetos y la resolución espacial del sensor.

Entorno espacial: Determinadas cubiertas pueden ser discriminadas con criterios de interpretación basados en el conocimiento del área de estudio por parte del intérprete. El contexto espacial es imposible abordar por técnicas digitales y permite afinar los resultados de cualquier tipo de interpretación.

Otros criterios: El reconocimiento de patrones espaciales, formas y contornos de elementos presentes en la imagen fruto de la ocupación antrópicas del territorio, así como elementos propios de la fecha de adquisición de las imágenes como son el conocimiento de la fenología del área de estudio y las sombras de la imagen.

FASE DE PRE PROCESAMIENTO

Los procedimientos de pre – procesamiento permiten corregir problemas geométricos y espectrales de las imágenes generados por diversas fuentes tales como distorsiones originadas por la plataforma satelital, el sistema de registro de datos del sensor, la rotación terrestre y la influencia de la atmósfera (Chuvieco 2007). El pre – procesamiento incluye correcciones radiométricas, geométricas, y remoción de nubes.

COMPOSICION DE BANDAS

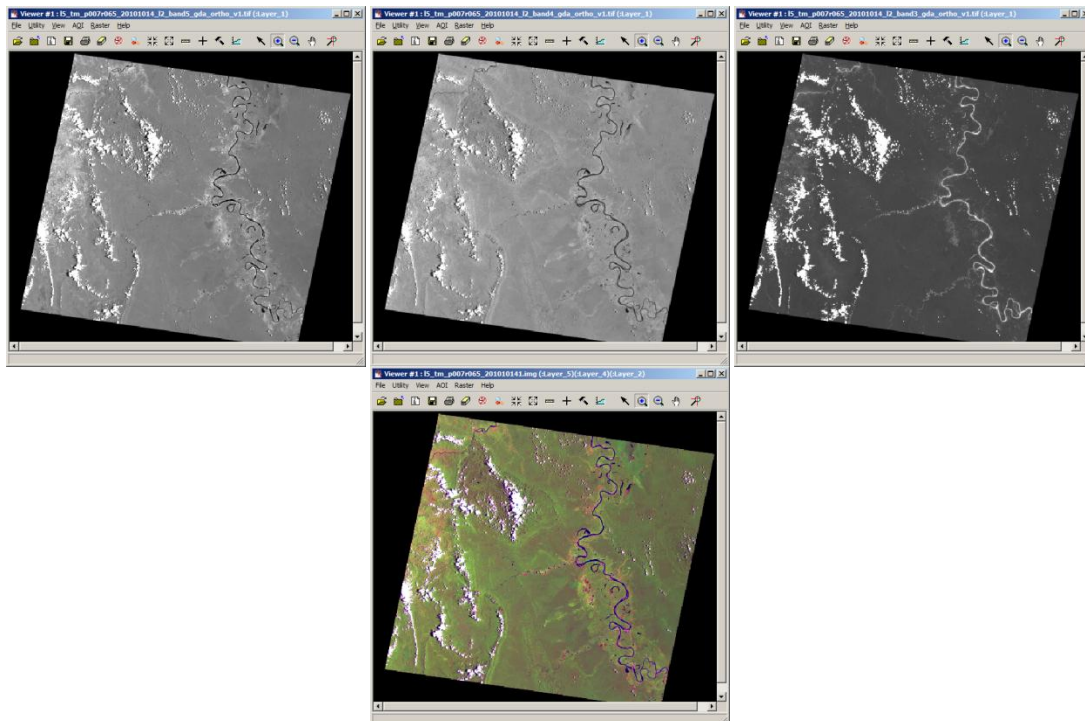
Las imágenes multiespectrales se captan mediante un sensor digital que mide la reflectancia en muchas bandas. Por ejemplo, un conjunto de detectores puede medir energía roja reflejada dentro de la parte visible del espectro mientras que otro conjunto mide la energía del infrarrojo cercano. Es posible incluso que dos series de detectores midan la energía en dos partes diferentes de la misma longitud de onda. Estos distintos valores de reflectancia se combinan para crear imágenes de color (color verdadero o falso color). Los satélites de teledetección multiespectrales

miden la reflectancia simultáneamente en un número de bandas distintas que pueden ir de tres a catorce.

Las imágenes LandSat 5 están conformadas por 7 bandas. Se seleccionaron y fusionan las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 (6 bandas) para generar una imagen multispectral en falso color que facilite la visualización de determinadas características para el análisis de cobertura y uso de los suelos.

Normalmente, una imagen de falso color utiliza al menos un canal de infrarrojo. La gama de infrarrojo es muy útil para interpretar la superficie terrestre, pues está formada por energía reflejada y emitida.

El infrarrojo no es visible para el ojo humano, pero transmite mucha información. Las plantas, en particular, reflejan mucha más energía en el infrarrojo cercano que en la gama visible del espectro electromagnético. La intensidad permite determinar incluso el estado de salud de la planta. A veces las imágenes de falso color llegan a revelar elementos no visibles en la imagen de color verdadero



CORRECCION GEOMETRICA

Las correcciones geométricas implican el cambio en la posición de los píxeles de la imagen satelital de forma que la información de la imagen quede correctamente referenciada a un sistema de coordenadas proyectado. De forma similar, se aplican correcciones geométricas para referenciar una imagen no corregida a una corregida. Esto permite integrar y comparar la información temática de uso y cobertura del suelo derivada de imágenes de distintas fechas para una misma área geográfica.

Este proceso permite eliminar distorsiones geométricas indeseables y ubicar la imagen en su ubicación espacial real.

La georeferenciación de las imágenes usadas en el análisis se hizo de imagen a imagen, usando como referencia las imágenes ortorectificadas del satélite Landsat proporcionadas por Conservación Internacional - CI, las cuales presentan una adecuada correspondencia con la información cartográfica recolectada con los navegadores GPS.

Esto comprendió definir los Puntos de Control Terrestres (GCP), los cuales poseen coordenadas conocidas y reconocibles en las imágenes fuente e imagen de referencia y remuestrear la imagen mediante el método de vecino más cercano (Nearest Neighbor), apoyado en una matriz de transformación polinomial de primer grado. Este método permite que la imagen original sea ubicada en su posición geográfica correcta y que además conserve, en lo posible, las características originales de los píxeles que podrían ser modificadas debido al desplazamiento de la imagen.

Root Mean Squared Error (RMS) o Error medio cuadrático, es el método usado para evaluar la calidad del algoritmo de interpolación espacial (Nearest Neighbor) y de los GCP seleccionados. Este debería ser menos a 1 pixel. Valores altos indican una mala selección de los GCP por lo cual será necesario tomar nuevos puntos y/o quitar que presenten altos valores de RMS.

En los casos donde no se pudo lograr disminuir el valor de RMS, se optó por dar prioridad a las zonas que presentan la actividad humana al momento de registrar los GCP, dejando en un segundo plano las extensas áreas de bosque intacto.

Cuando se realiza una registración es conveniente volver a realizar una inspección visual de la imagen resultante en comparación con la referencia.

En áreas con topografía compleja como los Andes (o selva alta), el relieve puede incluir errores aleatorios en el orden de 300 m a 700 m en imágenes LANDSAT y SPOT, respectivamente (Gupta 2003). Por lo tanto, en la presente metodología se requiere de un procedimiento de ortorectificación utilizando modelos digitales de elevación para compensar el desplazamiento debido al relieve.

Tanto la imagen de referencia como las imágenes a georeferenciar fueron trabajadas con la proyección UTM, zona 18 Sur, Datum WGS84, teniendo como unidad de medida al metro.

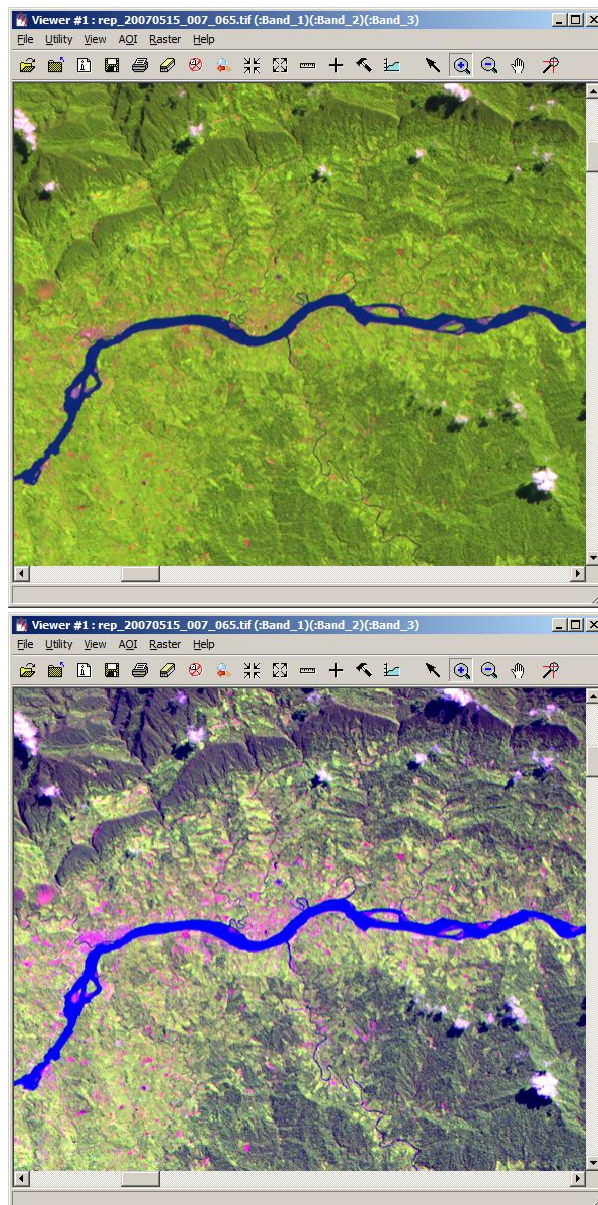
Este proceso en muchos casos fue obviado por dos motivos: las imágenes proporcionadas por fuentes como CI o la USGS presentaban una correcta georeferenciación y ortorectificación. Las imágenes que necesitan ser corregidas, normalmente las zonas de elevaciones pronunciadas, son encargadas a una consultoría externa para lograr la precisión que se requiere. Las imágenes que presenten superficies planas y uniformes son corregidas por el equipo de CIMA.

REALCES

Son procedimientos que tienden a mejorar la interpretabilidad visual de una imagen, aunque no aumentan la cantidad de información contenida en ella.

Esta mejora facilita la definición de las áreas de interés o áreas de muestreo en el proceso digital de clasificación supervisada y en la etapa de corrección mediante interpretación visual de las imágenes satelitales.

Se hicieron realces radiométricos de cada una de las imágenes a utilizar en el proceso, para mejorar su contraste y poder discriminar mejor los rasgos de una escena, estos realces realizan una expansión lineal de los histogramas empleando el método de desviación estándar (Standard Deviations) y usando el mecanismo de despliegue denominado LUT (Lookup Table).



FASE DE PROCESAMIENTO

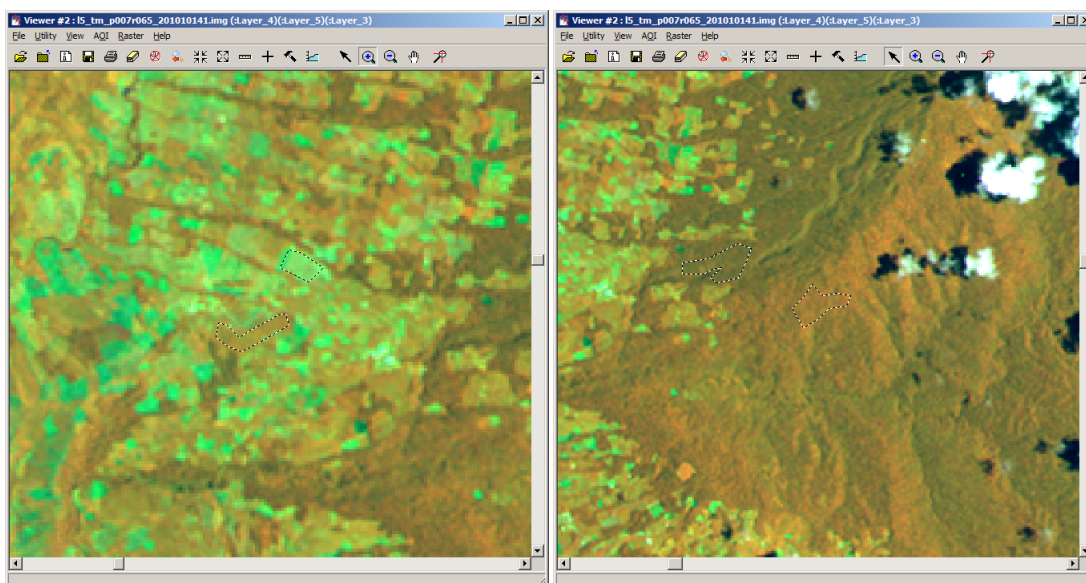
CLASIFICACION SUPERVISADA

La clasificación digital es un proceso que consiste en la agrupación automática de los píxeles de una imagen multi-espectral, generalmente sobre la base de similitudes entre los valores numéricos que las definen (reflectancia), en distintas categorías o clases (leyenda), ya sean predefinidas por el usuario (clasificación supervisada) o por el sistema de clasificación utilizado (clasificación no supervisada); de este proceso resulta un archivo raster temático de una sola banda, con diferentes categorías, cuyos valores representan categorías temáticas conocidas o por definir (Chuvieco,2002).

10

La Clasificación Supervisada permite extraer la información de la imagen de satélite y agruparla en clases dependiendo del tipo de análisis que se requiera, en este caso fue diferenciar las áreas de bosque y las áreas deforestadas. Se decidió por este método de clasificación por el conocimiento que se tiene del área de estudio, por la experiencia del equipo SIG en este tipo de análisis y por la información disponible de cobertura y uso actual de tierras en diferentes sectores del área de estudio resultantes de los procesos de Micro Zonificación Ecológica Económica desarrollados en la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Cordillera Azul (sectores Chazuta, Shamboyacu, Pólvora, Piquiyacu, Biavo, Pisqui y Cushabatay).

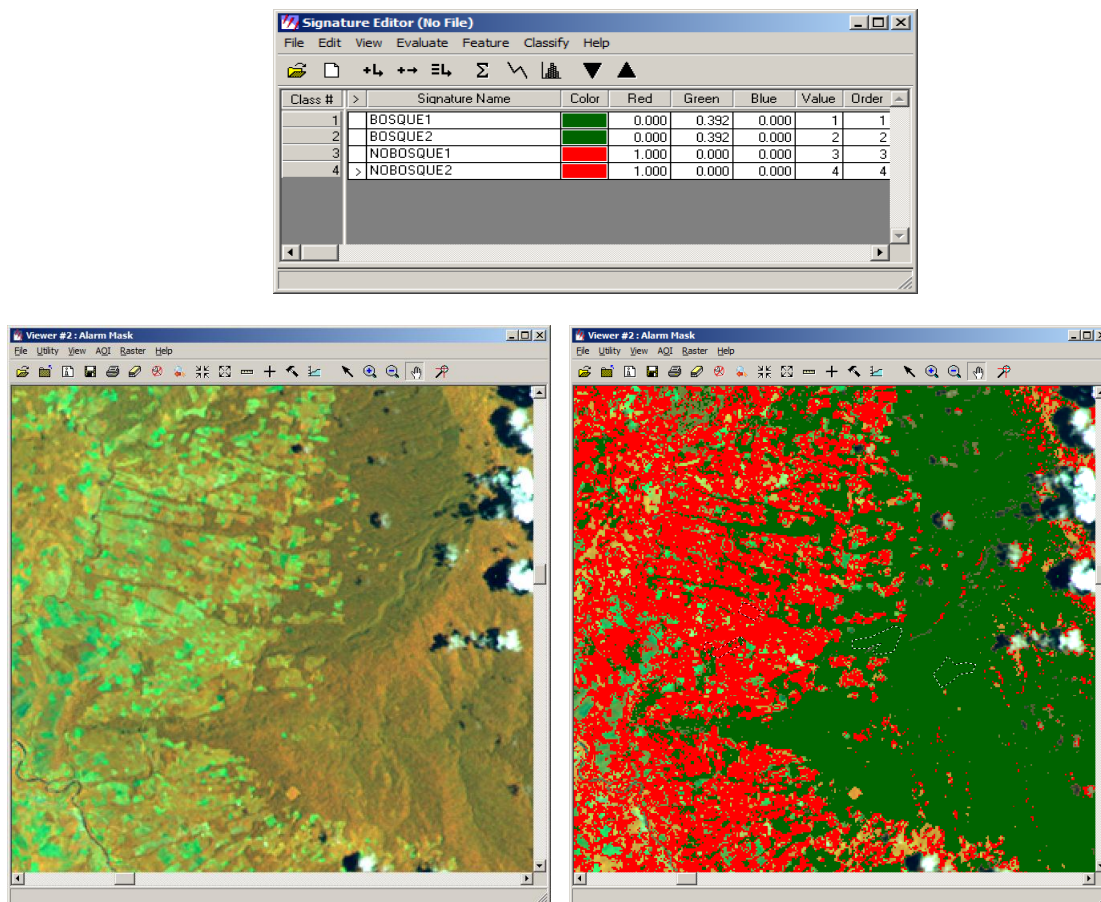
Después de determinar el sistema de clasificación, se procedió a determinar áreas de entrenamiento. Este método se basa en el reconocimiento de patrones en la respuesta espectral de los píxeles, posteriormente se dibuja un polígono (AOI, Area of interest) el cual se usa para crear la firma. Se debe establecer numerosas “clases” o firmas espectrales, a continuación éstas se agruparon hasta obtener el número de “clases” definidas para el estudio “bosque”, “no bosque”, “agua”, “nube”, “sombra” y “arena/playas”.



El algoritmo empleado para realizar esta clasificación o regla de decisión fue el de Máxima Probabilidad (Maximum Likelihood), el cual realiza el cálculo asignando cada píxel de la imagen a la clase que presenta mayor probabilidad de pertenencia. Este criterio, es el más empleado por ajustarse con más rigor a la disposición original de los datos. (Chuvienco, 1990).

Para entender el método de máxima probabilidad, Chuvienco (1990) propone un ejemplo con dados: supongamos que tenemos dos pares de dados: unos, con las caras numeradas del 1 al 6, y otro con las caras numeradas del 3 al 8. Si lanzamos uno de los pares y obtenemos un 7, el problema sería estimar qué par ha sido el utilizado, y un buen criterio es el de asignar la tirada al par más probable. Así, la probabilidad de obtener un 7 con el par de dados normales es 6/36 (las combinaciones posibles son 1-6, 6-1, 2-5, 5-2, 3-4, 4-3), mientras que la probabilidad de obtenerlo con el par anómalo es 2/36 (3-4 y 4-3). Por lo tanto, la tirada es asignada al par normal.

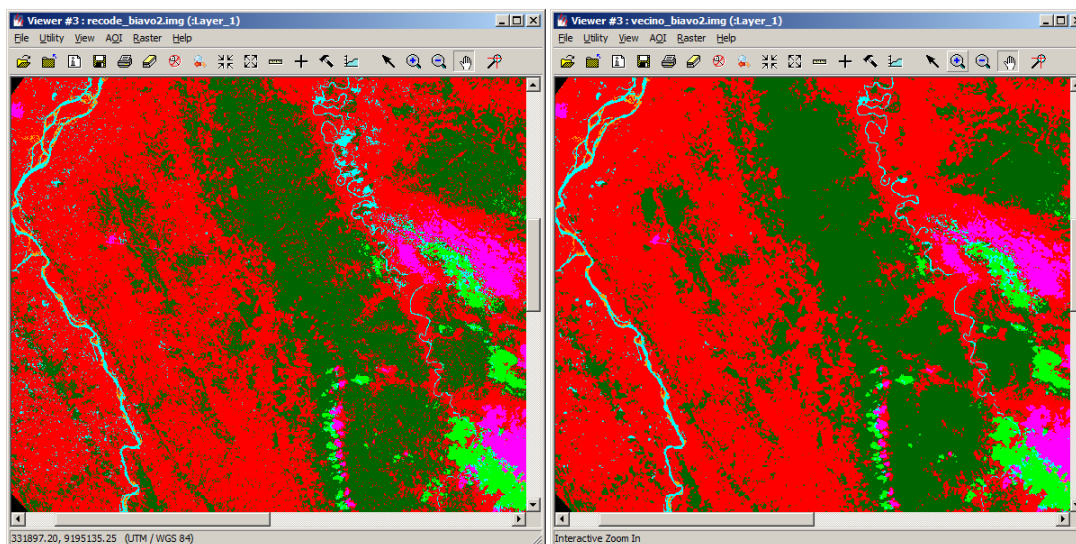
La traducción de este ejemplo al campo de la teledetección, se realiza de la siguiente forma: los dados son las clases y las tiradas son los niveles digitales de los píxeles a clasificar. En definitiva, calculamos las probabilidades de pertenencia de los píxeles a las distintas clases, y la asignación se produce a la clase que maximiza esa probabilidad.



La imagen resultante de la clasificación presenta una gran cantidad de clases, una por cada área de entrenamiento colectada, por lo cual debemos realizar una recodificación global de este resultado

para resumir las clases a solo las 6 categorías definidas para el análisis mediante la herramienta RECODE.

Con el fin de evitar el efecto “sal y pimienta”, se procedió a suavizar la matriz de valores, homogenizando valores considerados como “zumbido”, “ruido” o “factores de interferencia”. Usando la herramienta Neighborhood, se aplicó el filtro de 3x3, adecuado para la escala del producto final.



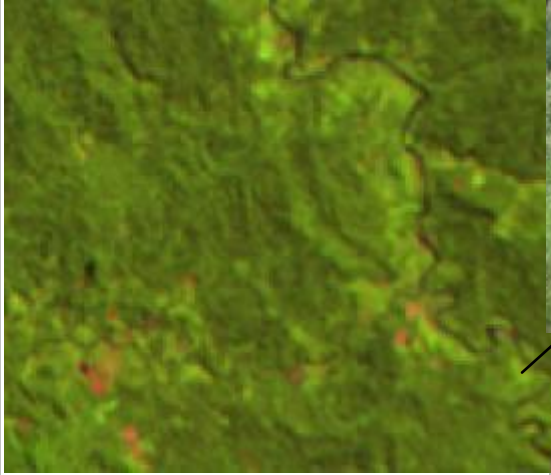
Una vez que todos los procesos para eliminar los problemas de la clasificación digital son realizados, el último paso es el de eliminar los píxeles menores o iguales a lo establecido como mínima unidad cartográfica, para nuestro caso fue establecido de 0.5 ha (6 píxeles).

CATEGORÍA NO BOSQUE

Dentro de esta categoría se encuentran las áreas sin vegetación, las áreas con cultivos temporales y permanentes (a excepción de cultivos de café bajo sombra con antigüedad menor a dos años) y las áreas de purmas con antigüedad menor a 15 años.

En las imágenes de satélites LANDSAT 5 (combinación de bandas 5, 4, 3 en los canales RGB) estas áreas se presentan: (1) en tonos rojizos a fucsias intensos en aquellas áreas sin ningún tipo de vegetación o con vegetación muy dispersa donde el suelo está expuesto, (2) en tonalidad azulada a marrón aquellas áreas de campos inundados para cultivos (arroz), (3) en tonalidades fucsias a moradas en aquellas áreas que han sufrido algún tipo de quema de la cobertura vegetal (4) en tonalidades anaranjadas a amarillo verdosos en aquellas áreas de pastizales y purmas bajas y (7) en diferentes tonalidades de verde claro en aquellas áreas con cultivos temporales, permanentes y las purmas medias. En estas áreas la textura varía de lisa a ligeramente rugosa a causa del tipo y tamaño de vegetación, estas áreas se caracterizan también por poseer formas geométricas irregulares.

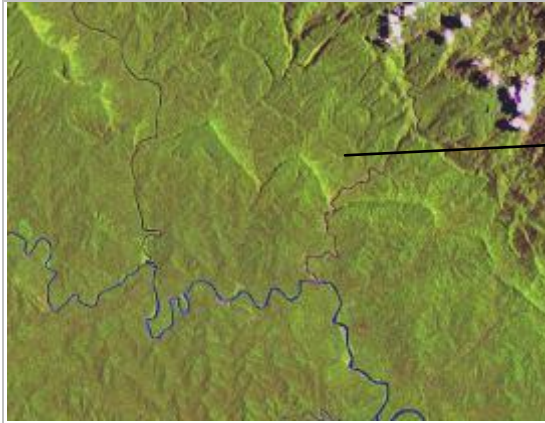


	 Cobertura vegetal: plátano y cacao Sector: Comunidad Nativa Mushuck Llacta, en la margen izquierda de la quebrada Chipaota.
	 Cobertura vegetal: pastizal Sector: margen derecha del río Ponasa, en el Centro Poblado Simón Bolívar.
	 Cobertura vegetal: arrozal inundado Sector: margen derecha del río Huallaga, en el distrito de Picota.

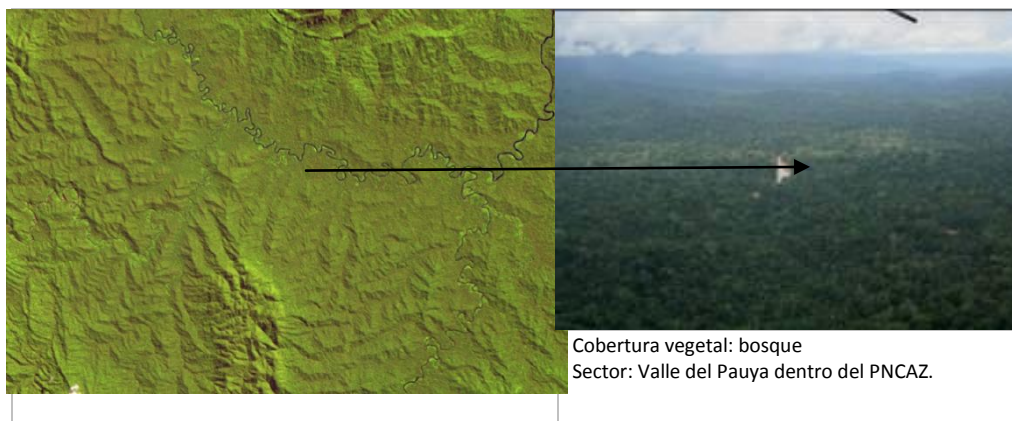
CATEGORÍA BOSQUE

Dentro de esta categoría se encuentran las áreas con bosque primario, café bajo sombra con antigüedad mayor a dos años y las áreas de purmas con antigüedad mayor a 15 años.

En las imágenes de satélites LANDSAT 5 (combinación de bandas 5, 4, 3 en los cañones RGB) estas áreas se presentan en diferentes tonos de verde oscuro. La textura es mayormente rugosa a causa del tipo y tamaño de vegetación, a excepción de las zonas de humedales (aguajales, renacales, pantanos, etc.) que presentan una textura lisa y una coloración verde clara muy intensa.

	 Cobertura vegetal: bosque Sector: Laguna del Mundo Perdido, en la parte norte del PNCAZ.
	 Cobertura vegetal: bosque Sector: Cinco Puntos, en la parte nor-oriental del PNCAZ.

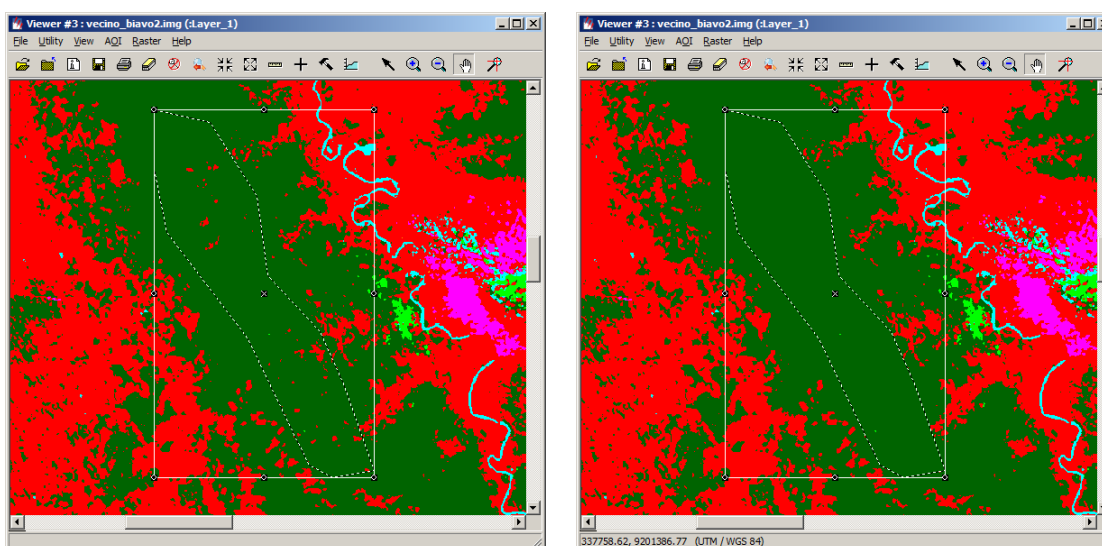
	 Cobertura vegetal: bosque Sector: parte nor-oriental del PNCAZ.
	 Cobertura vegetal: bosque Sector: parte norte del PNCAZ, cercano a sector Cinco Puntos.
	 Cobertura vegetal: bosque Sector: Cruce del PNCAZ, vistas desde el Puesto de Control 16.



CORRECCIONES MEDIANTE INTERPRETACION VISUAL DE IMÁGENES

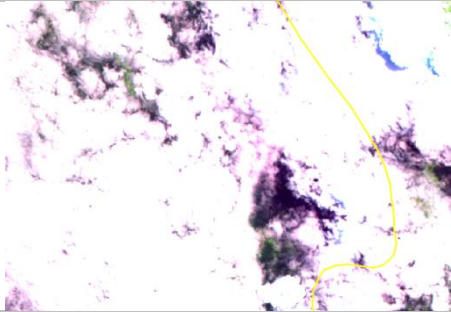
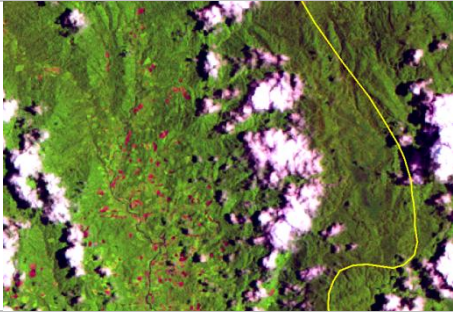
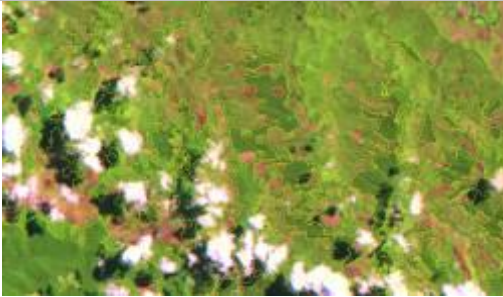
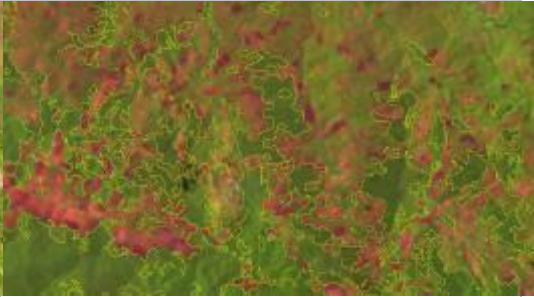
Además de la clasificación digital se realizó una combinación con una digitalización visual, en unidades que presentaban una importante confusión en la clasificación digital. La clasificación resultante posee varios tipos de errores (debido a nubes, sombras, laderas iluminadas, errores de la imagen, por mencionar los más importantes), debido a las características geográficas y climáticas del área de estudio. Por ello es necesario realizar correcciones de las unidades resultantes de la clasificación supervisada mediante la interpretación visual.

Con la ayuda de la herramienta RECODE se procedió a realizar una recodificación localizada en las zonas de confusión, demarcamos estas zonas mediante AIOs y las reclasificamos a la categoría correcta. Para llevar a cabo esta recodificación local hacemos uso de los criterios propios de la fotointerpretación.



CORRECCION DE VACIOS DE INFORMACION POR NUBES Y SOMBRAS

Uno de las mayores dificultades encontradas en la clasificación de las imágenes fue el alto porcentaje de nubosidad de las escenas, lo cual conlleva a la perdida de información en estas áreas. Para compensar estos vacíos de información se procedió a: (1) completar los vacíos con la información de las imágenes Landsat de los años anterior y posterior al año de análisis, (2) las áreas que aun continuaban sin información fueron clasificadas como bosque luego de verificar esta información a través otro tipo de imágenes de satélite (ASTER y SPOT), del patrullaje del personal de guardaparques del ANP, de sobrevuelos en avioneta y del mismo trabajo de campo como parte del levantamiento de información de stock de carbono. Logrando completar así la clasificación para la totalidad del área de estudio.

Imagen Landsat 5 del año 2010	Imagen Landsat 5 del año 2009
	
Áreas con nubes en la imagen de satélite Landsat del año 2010 son las áreas con vacíos de información.	Para completar estos vacíos de información se usaron las imágenes de un año anterior y un año posterior esta imagen, en este caso la imagen del 2009 es la que nos permite completar la información de cobertura para las áreas con vacíos de información.
	

EVALUACIÓN DE EXACTITUD

La evaluación de la exactitud temática en los trabajos de teledetección y fotointerpretación, suele hacerse en forma de matriz de error, también denominada tabla de contingencia o matriz de

confusión. El ordenamiento de esta matriz suele ser tal que las clases reales (verdad terreno) aparecen en columnas, mientras que las unidades cartografiadas (unidades del mapa) aparecen en las filas de la matriz. La tabla así formada nos presenta una visión general de las asignaciones, tanto de las correctas (elementos de la diagonal) como de las migraciones o fugas (elementos fuera de la diagonal). De esta forma se recogen los denominados errores de omisión y de comisión. **Los errores de comisión** lo forman los elementos que no perteneciendo a una clase aparecen en ella, mientras que **los de omisión** están formados por los elementos que perteneciendo a esa clase no aparecen en ella por estar incorrectamente incluidos en otra. Estos errores se denominan también como errores del usuario y del productor, respectivamente.

La evaluación de la precisión se efectuó comparando dos fuentes de información: i) el mapa derivado de la clasificación digital, y ii) La información de campo levantada con el apoyo de los sistemas de posicionamiento global – GPS.

Para la realización de esta etapa se ubicaron, sobre el área acotada en donde se realizó la clasificación, puntos de muestreo denominados píxeles de referencia (Jensen, 1996).

Para determinar la cantidad de puntos de control, se debe tener en cuenta el tamaño de la superficie a muestrear y la cantidad de categorías, en este sentido Congalton (1991).

A partir de estos puntos de muestreo se efectuó la relación entre los dos sets de información, que corresponde a la imagen clasificada y la información de referencia, generando una matriz de confusión. Esta matriz se conforma de filas y columnas en donde se ubican los valores que expresan el número de píxeles de referencia asignados a una categoría particular, en relación con la verdadera categoría verificada con la información auxiliar.

La información resultante de la matriz de confusión se evaluó utilizando diferentes mediciones de la precisión. Estos se detallan a continuación:

Precisión del productor: se calculó realizando la división entre el número total de píxeles clasificados correctamente en una categoría y el número total de píxeles de esa categoría, según la fórmula:

$$PP \% = (X_{ii} / X_{+i}) \times 100$$

Donde: PP%: es la precisión del productor en porcentaje.

X_{+i}: los totales marginales de la columna i.

X_{ii}: es el valor de la diagonal de dicha columna.

Este estadístico indica la probabilidad de que un píxel de referencia sea correctamente clasificado. Es una medida del error de omisión (Jensen, 1996) que se produce cuando un píxel posee en el terreno una cobertura determinada y no es asignado en el mapa a esa clase.

Precisión del usuario: El cálculo se efectuó dividiendo el número total de píxeles correctos en una categoría por el número total de píxeles que son efectivamente pertenecientes a esa categoría, utilizando la siguiente fórmula:

$$PU \% = (X_{ii} / X_{i+}) \times 100$$

Donde: PU%: es la precisión del usuario en porcentaje.

X_{i+} : totales marginales de la fila i.

X_{ii} : la diagonal de dicha fila.

Esta medida muestra la probabilidad de que un píxel clasificado en el mapa verdaderamente represente esa categoría en el terreno (Story y Congalton, 1986). La desviación producida se denomina error de comisión.

Ejemplo de Matriz de Confusión

Clasificación	Datos de referencia en el terreno						Total	P Usuario %	E Comisión %
	Bosque natural	Pasto plantado	Cultivos de ciclo corto	Vegetación riparia	Vegetación arbustiva	Vegetación herbácea			
Bosque natural	109	3	2	1	7	0	122	89,34	10,66
Pasto plantado	5	20	2	0	8	1	36	55,56	44,44
Cultivos de ciclo corto	4	5	13	0	4	1	27	48,15	51,85
Vegetación riparia	0	2	0	23	2	5	32	71,88	28,13
Vegetación arbustiva	2	0	2	0	68	0	72	94,44	5,56
Vegetación herbácea	3	1	0	2	0	20	26	76,92	23,08
Total	123	31	19	26	89	27	315		
P Productor %	88,62	64,52	68,42	88,46	76,40	74,07			
E Omisión %	11,38	35,48	31,58	11,54	23,60	25,93			

Fuente: Estudio multitemporal del Nor-orient e del Ecuador

Se aprecia en la tabla que la precisión de la clasificación para la cobertura de bosque natural muestra valores elevados tanto en la precisión del productor como en el usuario. Esto podría indicar que esta clase logra clasificarse sin grave riesgo de confusión con otro tipo de cobertura vegetal. Las bajas precisiones para las clases de ocupación del suelo de cultivos de ciclo corto y su asociación con pastos plantados indican confusiones mutuas; lo que no representa un problema para este análisis, ya que, en cuanto a la temática que aborda este análisis no representa un error ya que ambos son usos antrópicos.

Esta matriz demuestra que la metodología usada es adecuada para determinar vegetación natural.

Análisis kappa es una medida estadística de acuerdo, más allá de un efecto al azar, entre los puntos interpretados y los puntos de referencia (Congalton & Green 2008). El Análisis Kappa incorpora errores de omisión y comisión en una sola medida.

$$k = \frac{N \sum X_{ii} - \sum X_{i+} X_{+i}}{N^2 - \sum X_{i+} X_{+i}}$$

En donde **X_{ii}** el número de observaciones en la fila i y columna i; **(X_{i+} X_{+i})** son el total de marginal de fila i y columna i, respectivamente y **N** es el total de observaciones.

Para valorar el grado de acuerdo en función del índice kappa, nos basamos en los rangos propuestos por Landis y Koch que establecen los siguientes valores:

kappa	grado de acuerdo
< 0	sin acuerdo
0 - 0,2	insignificante
0,2 - 0,4	bajo
0,4 - 0,6	moderado
0,6 - 0,8	bueno
0,8 - 1	muy bueno

LISTADO DE IMÁGENES USADAS PARA PERIODO DE ANÁLISIS



22

AÑO DE ANALISIS	AÑO DE TOMA	SATELITE	FECHA DE TOMA dd/mm	PATH/ROW	SENSOR	FUENTE
2010	2009	LANDSAT 5	31/08	8/65	TM	INPE
	2010	LANDSAT 5	14/10	7/64	TM	CI
			14/10	7/65		CI
			11/08	7/65		CI
			14/10	7/66		CI
			18/08	8/64		CI
			18/08	8/65		CI
			18/08	8/66		CI
	2011	LANDSAT 5	15/09	7/65	TM	CI
			29/07	7/66		CI
			06/09	8/86		USGS
2008	2007	LANDSAT 5	15/05	7/65	TM	INPE
			30/01	8/65		INPE
	2008	LANDSAT 5	12/08	7/64		CI
			05/08	7/65	TM	INPE

	2009	LANDSAT 5	11/10	7/64	TM	CI
			11/10	7/66		INPE
2003	2003	LANDSAT 5	24/08	7/64	TM	INPE
			25/09	7/65		INPE
			16/09	8/64		INPE
			18/10	8/65		INPE
			15/08	8/66		INPE
			31/01	7/66		CI
	2004	LANDSAT 5	31/01	7/66	TM	CI
1999	1999	LANDSAT 5	14/09	7/64	TM	INPE
			05/08	7/65		CI
			05/08	7/66		USGS
			11/07	8/64		CI
			11/07	8/65		CI
			11/07	8/66		USGS
			11/07	8/66		USGS
1989	1988	LANDSAT 5	23/09	7/64	TM	USGS
			23/07	8/64		USGS
	1989	LANDSAT 5	14/08	7/65	TM	INPE
			14/08	7/66		INPE
			23/07	8/65		USGS
			24/08	8/65		INPE
			23/07	8/66		USGS
			23/07	8/66		USGS

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE EXACTITUD POR PERIODO

ANÁLISIS 2003

Clase campo	Clase mapa		Total	Exactitud (%)	Error de Omisión (%)
	Bosque	No Bosque			
Bosque	234	8	242	96.7	3.3
No bosque	41	102	143	71.3	28.7
Total	275	110	385		
Exactitud (%)	85.1	92.7			
Error de comisión (%)	14.9	7.3			

Índice Kappa = 0.71

Grado de acuerdo = Bueno

ANÁLISIS 2008

Clase campo	Clase mapa		Total	Exactitud (%)	Error de Omisión (%)
	Bosque	No Bosque			
Bosque	96	21	117	82.1	17.9
No bosque	10	129	139	92.8	7.2
Total	106	150	256		
Exactitud (%)	90.6	86.0			
Error de comisión (%)	9.4	14.0			

Índice Kappa = 0.73044294

Grado de acuerdo = Bueno

ANÁLISIS 2010

Clase campo	Clase mapa		Total	Exactitud (%)	Error de Omisión (%)
	Bosque	No Bosque			
Bosque	35	11	46	76.1	23.9
No bosque	8	57	65	87.7	12.3
Total	43	68	111		
Exactitud (%)	81.4	83.8			
Error de comisión (%)	18.6	16.2			

Índice Kappa = 0.64

Grado de acuerdo = Bueno