

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**POSTGRADO EN INGENIERIA AGRICOLA Y USO INTEGRAL DEL
AGUA**

**DETECCION Y ANALISIS DEL CAMBIO FISIOGRAFICO
EN LOS ANDES CENTRALES BOLIVIANOS MEDIANTE
PERCEPCIÓN REMOTA**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

P R E S E N T A :

RONALD ERNESTO ONTIVEROS CAPURATA

CHAPINGO, MÉXICO, ENERO DE 2005



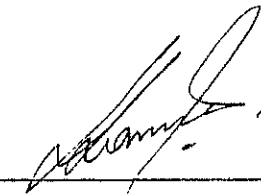
DETECCION Y ANALISIS DEL CAMBIO FISIOGRAFICO EN LOS ANDES CENTRALES BOLIVIANOS MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA.

Tesis realizada por Ronald Ernesto Ontiveros Capurata, bajo la dirección del Dr. Lamine Diakite D., aprobada y aceptada por el Comité Asesor indicado, como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERIA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

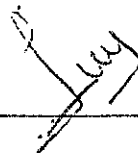
COMITÉ ASESOR:

DIRECTOR :



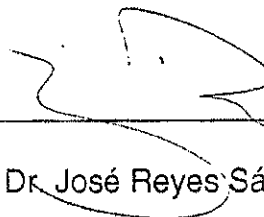
Dr. Lamine Diakite Diakite

ASESOR :



Dra. Laura Ibáñez Castillo

ASESOR :



Dr. José Reyes Sánchez

Chapingo, México, Enero de 2005

El autor y el Director de tesis dan permiso de poner esta tesis a la disposición del público para consulta, así mismo copiar partes de ella para uso personal. Cualquier otro uso cae dentro de las restricciones de derecho de autor, especialmente la obligación de mencionar explícitamente la fuente cuando citan partes de esta tesis

Chapingo, México, diciembre 2004

Ing. RONALD E. ONTIVEROS C.

DR. LAMINE DIAKITE D.

DEDICATORIA

A mis padres Ernesto y Gloria por todo el esfuerzo que hicieron y hacen para hacer de sus hijos hombres de bien y por que aun estando lejos supieron transmitirme confianza y seguridad, pero sobre todo por su amor para poder sobrellevar cualquier contratiempo que se presentara.

A mi hermano Rodrigo por estar siempre conmigo en la distancia y contagiarme esa fuerza en el momento oportuno para continuar con este reto.

A mis primos Maris, Alejandro, Marcelo y Ana, para que este trabajo sirva como ejemplo de que cualquier objetivo trazado se puede alcanzar solo en base a grandes sacrificios, esfuerzo y perseverancia.

A toda mi familia que supieron hacerme saber que contaba con su apoyo y aliento en todo momento para alcanzar este logro anhelado.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaria de Relaciones Exteriores del Gobierno de México a través del programa de Becas para extranjeros, por la beca otorgada para realizar los estudios de maestría en México.

A la Universidad Autonoma Chapingo y al Postgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua por permitirme realizar los estudios de maestría y ser parte de tan prestigiosa institución.

Al Dr. Lamine Diakite Diakite, por su apoyo y consejos y por compartir sus conocimientos y experiencia de una manera desinteresada para la realización de este trabajo y mi formación profesional. Pero sobre todo por su amistad y apertura para contar con el de manera incondicional en cualquier momento.

A la Dra. Laura Ibáñez Castillo por todos los conocimientos compartidos, las valiosas correcciones realizadas al presente trabajo y por la predisposición de colaboración para con todos.

Al Dr. José Reyes por formar parte del presente trabajo en calidad de asesor, cuyas valiosas sugerencias y correcciones enriquecieron la investigación.

A todos los profesores del Postgrado en Ingeniería Agrícola con los cuales tuve el privilegio de tomar cursos, por compartir sus conocimientos de manera desinteresada.

A todos mis compañeros estudiantes del Postgrado, por el apoyo y amistad brindada durante la realización de este trabajo, grandes amigos que serán recordados siempre.

A todas las personas que directamente o indirectamente colaboraron en este trabajo y que no se detallan aquí no por ser menos importantes sino que escapan a la memoria, mis mas grandes agradecimientos y amistad incondicional.

BIOGRAFÍA

Ronald Ernesto Ontiveros Capurata, nació el 01 de agosto de 1978, en la ciudad de La Paz, Bolivia, inició sus estudios en el colegio “San Antonio de Padua” en La Paz, obteniendo el título de bachiller en humanidades en el año 1995.

Ingresó a la carrera de Ingeniería Agronómica en la Escuela Militar de Ingeniería ‘Mcal. Antonio José de Sucre’ de la ciudad de La Paz en el año 1996, egresando en el año 2000, para posteriormente realizar su trabajo de tesis gracias al apoyo del Programa Interinstitucional Suka Kollus (PROSUKO), titulándose en el año 2001.

A partir del año 2002 ingresó a trabajar al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología en La Paz (SENAMHI) como técnico en agro climatología .

En Febrero de 2003, gracias a una beca otorgada por la Secretaría de Relaciones Exteriores de México, hace su ingreso al Programa de Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo, en México, titulándose en enero de 2005.

**DETECCION Y ANALISIS DEL CAMBIO FISIOGRAFICO EN LOS ANDES
CENTRALES BOLIVIANOS MEDIANTE PERCEPCION REMOTA**
**PHYSIOGRAPHIC CHANGE DETECTION AND ANALYSIS IN THE BOLIVIAN CENTRAL
ANDES THROUGH REMOTE SENSING DATA**

Ronald E. Ontiveros Capurata Director: Dr. Lamine Diakite Diakite

Postgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo, México

RESUMEN

La detección y análisis de los cambios en las características fisiográficas en los Andes centrales bolivianos, tales como cambios en el uso del suelo, deforestación y disminución de los cuerpos de agua especialmente en el lago Titicaca, constituyen el tema de la presente investigación. Tres imágenes de satélite (ERTS-1 MSS 1972, Landsat TM 1987 y Landsat ETM+ 2002) fueron analizadas para evaluar el cambio en las “unidades morfopedológicas”. Veinte unidades morfopedológicas fueron descritas en función de las características foto-geológicas, morfométricas, de uso y manejo de suelo y constituyeron las unidades básicas de manejo integrado y uso sostenible de la tierra. El resultado obtenido mostró que hubo cambio notorio en los ecosistemas en el periodo 1987-2002 principalmente en la disminución del tamaño del lago Titicaca y disminución de las áreas forestales. La reducción de la superficie del lago correspondió a 8,605 has de agua que actualmente corresponde a suelo. La tasa

de deforestación anual para el mismo periodo fue de 40.8 km².

Palabras clave: imágenes satelitales, unidades morfopedológicas, deforestación

1 Tesista

2 Director de tesis

ABSTRACT

The detection and analysis of changes in the physiographic characteristics in the Bolivian central Andes, such as land use changes, deforestation and reduction of water bodies, especially of Lake Titicaca, is the objective of this research. Three satellite images (ERTS-1 MSS 1972, Landsat TM 1987 and Landsat ETM+ 2002) were analyzed for the detection of changes at the morphopedological unit level. Twenty morphopedological units based on land use, soil management, photogeological and morphometrical characteristics were described; these units were used as basic units for integrated management and sustainable land use. The results indicate that there were evident changes in the ecosystems during the period between 1987 and 2002, mainly in the reduction in size of Lake Titicaca and in the

reduction of forest areas. The reduction of the lake area was 8,605 hectares of water, which at present is bare soil. The annual rate of deforestation was calculated at 40.8 km².

Keywords: Satellite images. morphopedological units, deforestation.

1 Thesis author

2 Thesis director.

TABLA DE CONTENIDO

	Pg.
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3. REVISION DE LITERATURA	4
4. MATERIALES Y METODOS	7
4.1 AREA DE ESTUDIO.....	7
4.1.1 Características fisiográficas del área de estudio	8
4.1.2 Características climáticas del área de estudio.....	8
4.2 MATERIALES	13
4.2.1 Imágenes de satélite	13
4.2.2 Software para procesamiento digital y sistemas de información geográfica	14
4.2.3 Cartas topográficas y mapas	14
4.3 METODOS	14
4.3.1 Pre-procesamiento de imágenes	14
4.3.1.1 Corrección radiométrica	15
4.3.1.2 Corrección geométrica	16
4.3.2 Caracterización de las unidades morfopedológicas	17
4.3.3 Clasificación de imágenes	21
4.3.4 Detección de cambio	24
5 RESULTADOS Y DISCUSIONES	26

5.1	PREPROCESAMIENTO DE IMÁGENES	26
5.2	CARACTERIZACIÓN AGRO CLIMÁTICA Y PEDOClima	26
5.3	CARACTERIZACIÓN MORFOPEDOLÓGICA	31
5.3.1	Unidades fisiográficas y morfometría	31
5.3.2	Unidades morfopedológicas	35
5.3.3	Vegetación y uso de suelo.....	49
5.4	ANÁLISIS DE CAMBIO	55
5.4.1	Cambios en el nivel del lago Titicaca	55
5.4.2	Cambios en la vegetación, suelo y uso de suelo.....	58
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	61
6.1	CONCLUSIONES	61
6.2	RECOMENDACIONES.....	62
	BIBLIOGRAFÍA.....	63

LISTA DE TABLAS

	Pg.
Tabla 1. Estaciones meteorológicas de la región de estudio.....	9
Tabla 2. Temperaturas de la región de estudio	9
Tabla 3. Características de los sensores	13
Tabla 4. Características espectrales de los sensores	13
Tabla 5. Formato de las imágenes utilizadas.....	14
Tabla 6. Algunos atributos topográficos primarios, significado y expresión matemática. (Wilson, 2000; Wood, 2004).....	20
Tabla 7. Método de calculo de las formas del terreno por maximización de la función z (Wood, 2004).....	21
Tabla 8. Coeficientes de la matriz de la transformación para la imagen Landsat ETM+.....	26 27
Tabla 9. Evapotranspiración potencial media mensual (mm/día).....	29
Tabla 10. Régimen de temperatura y de humedad.....	30
Tabla 11. Calendario de humedad del suelo.....	51
Tabla 12. Descripción de las unidades morfopedológicas.....	
Tabla 13. Matriz de error de la clasificación de la imagen Landsat TM (02/08/1987).....	54
Tabla 14. Matriz de error de la clasificación de la imagen Landsat ETM+ (07/11/2002).....	55
Tabla 15. Niveles de cambio en la intensidad de brillo de los píxeles para el par de imágenes de 1987 y 2002.....	57
Tabla 16. Análisis de cambio en vegetación, suelos y condiciones de humedad y nubosidad.....	60

LISTA DE FIGURAS

	Pg.
Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.....	7
Figura 2. Perfil transversal del área de estudio mostrando las unidades eco- fisiográficas (Elaborado a partir del modelo de elevación digital).....	8
Figura 3. Comportamiento anual histórico (A) y distribución mensual (B) de las temperaturas medias en los Andes centrales bolivianos	10
Figura 4. Comportamiento de la precipitación total anual histórica (A) y distribución mensual de la precipitación media (B) en los Andes centrales bolivianos.....	12 18
Figura 5. Metodología para la caracterización morfo-pedológica.....	
<i>Figura 6. Metodología de detección de cambio mediante comparación de imágenes clasificadas (Jensen, 1996)</i>	25 28
Figura 7. Balance hídrico para las estaciones de referencia.....	
Figura 8. Modelo de elevación digital (A) y perfil transversal (B) trazado a lo largo de la línea AB.....	32
Figura 9. Superposición de la imagen morfométrica y mapa morfo-pedológico de los Andes centrales bolivianos.....	34 36
Figura 10. Fotogeología de la unidad I-1.....	37
Figura 11. Fotogeología de la unidad I-2s.....	37
Figura 12. Fotogeología de la unidad I-3d.....	38
Figura 13. Fotogeología de la unidad II-1p.....	39
Figura 14. Fotogeología de la unidad II-2m.....	40
Figura 15. Fotogeología de la unidad II-3a	40
Figura 16. Fotogeología de la unidad II-3b.....	41

Figura 17. Fotogeología de la unidad II-3c.....	42
Figura 18. Fotogeología de la unidad II-3d.....	43
Figura 19. Fotogeología de la unidad III-1.....	43
Figura 20. Fotogeología de la unidad III-2.....	44
Figura 21. Fotogeología de la unidad IV-1.....	45
Figura 22. Fotogeología de la unidad IV-2.....	46
Figura 23. Fotogeología de la unidad IV-3.....	47
Figura 24. Fotogeología de la unidad V-1.....	48
Figura 25. Fotogeología de la unidad V-2.....	49
Figura 26. Fotogeología de la unidad V-3.....	50
Figura 27. Mapa morfopedológico de los Andes centrales bolivianos.....	52
Figura 28. Uso de suelo a partir de la imagen Landsat TM (1987).....	53
Figura 29. Uso de suelo a partir de la imagen Landsat ETM+ (2002).....	56
Figura 30. Límite visual del lago Titicaca en los periodos 1987 (A), 2002 (B) y sobreposición de ambos (C) donde el color rojo indica la superficie de retroceso del nivel de agua	58
Figura 31. Imágenes clasificadas del lago Titicaca para los periodos 1987 (A), 2002 (B), imagen de cambio con siete (C) y dos (D) categorías.....	59
Figura 32. Imágenes clasificadas para el periodo 1987 (A), 2002 (B) e imagen de cambio (C).....	

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas de los países en desarrollo es el uso ineficiente e irracional de los recursos naturales, que trae como consecuencia problemas de erosión de suelos, contaminación de aguas y deforestación entre otros. Durante la década de los ochentas se deforestaron más de 7.4 millones de hectáreas a nivel mundial, del cual 85% correspondió a la cuenca del Amazonas (Jaramillo y Kelly, 2004). Estudios realizados por la FAO indicaron que la tasa anual de pérdida de bosques entre 1992 y 1996 fue de 62,050 Km² (Tucker and Townshed, 2000).

Para el caso de Bolivia la deforestación de la región amazónica constituye uno de los principales problemas ecológicos. Los nuevos asentamientos humanos en las tierras bajas, producto de la migración poblacional desde los años setenta, condujo a la incorporación de nuevas tierras agrícolas en el bosque tropical. Según el CUMAT (1992), alrededor de 700 km² fueron deforestados anualmente de 1985 a 1990, y 20,000 km² solo en 1986, cantidad que aumentó de acuerdo con Perz *et al*, (2003) a 24,000 en 1990. La tasa anual de deforestación para Bolivia en el periodo de 1990 a 1995 fue de 5,810 km² (FAO, 1996).

Ante esta situación y como parte de una política de conservación y uso sustentable de los recursos naturales, se han tomado algunas medidas enfocadas principalmente a la creación y caracterización de áreas protegidas y parques nacionales. Los primeros estudios realizados en estas áreas fueron enfocados a inventarios físico-biológicos, incluyendo aspectos de diversidad ecológica (Charrie y Muñoz, 1993; Herial *et al*, 1993; Smith y Killeen, 1995). Los estudios posteriores de zonificación agro-ecológica integraron la información existente con aspectos socioeconómicos así como aplicaciones a aspectos de conservación de recursos naturales (ZONISIG, 1998; Euroconsult, 2001; CEDEFOA, 2001; Navarro y Maldonado, 2002; OEA, 2003; CARE, 2003, SERNAP, 2004). A pesar de los estudios anteriores no se cuenta con una tasa confiable del deterioro de los recursos naturales a mediano y largo plazo.

Los andes centrales bolivianos, por su complejidad geodinámica, requieren de un estudio en series de tiempo para determinar la velocidad y tasa de deterioro de los ecosistemas. El presente trabajo pretende usar tres imágenes de satélite correspondientes a los años 1972, 1987 y 2002 para analizar el cambio fisiográfico ocurrido durante los últimos 30 años, en los ecosistemas y determinar las causas y las medidas que deben aplicarse para contrarrestar el proceso de degradación de los recursos naturales.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el cambio en las características fisiográficas de los andes centrales bolivianos mediante un estudio de las imágenes de satélites Landsat MSS 1972, TM 1987 y ETM+ 2002 en series de tiempo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar una caracterización morfopedológica del área de estudio y analizar el cambio morfológico de las unidades, especialmente la extensión del lago Titicaca.
2. Analizar el cambio de uso del suelo en la cuenca amazónica de los Andes Centrales Bolivianos durante el periodo de estudio.
3. Analizar el grado y velocidad de avance de la deforestación y la subsecuente erosión de los suelos.

3. REVISION DE LITERATURA

3.1 Percepción remota.

El termino “percepción remota” tiene varias definiciones, es la ciencia o arte para conocer algo sobre un objeto sin tener contacto directo con el, este conocimiento del medio físico se obtiene midiendo la radiación electromagnética usando cámaras, radiómetros, escáneres, sistemas de radar, sondas y receptores de frecuencias, una definición aplicada al estudio de la superficie terrestre es dada por Campbell (1996) el cual indica que percepción remota es “la practica para obtener información sobre los objetos terrestres a partir de imágenes satelitales o aéreas usando la radiación electromagnética reflejada o emitida de la superficie en una o mas regiones del espectro electromagnético”. A partir de esta información los objetos se identifican y clasifican por clases, naturaleza y distribución espacial.

3.2 Levantamiento fisiográfico

El levantamiento fisiográfico surgió como una necesidad de obtener información integrada sobre los recursos naturales, de tal manera que permita predecir las potencialidades de uso de la tierra en grandes superficies, a un costo bajo y tiempo corto. El levantamiento fisiográfico parte del concepto de “tierra” que se define como “un área sobre la superficie terrestre cuyas características abarcan

todos los atributos estables o cíclicamente predecibles de la biosfera incluyendo la atmósfera del suelo, geología, hidrológica, vegetación, fauna y actividades humanas” (Christian y Stewart, 1968). Los diferentes atributos varían individualmente y colectivamente dando como resultado paisajes característicos (Ortiz-Solorio y Cuanalo, 1978). Corresponde al levantamiento fisiográfico la identificación, descripción y delimitación de estos paisajes, para lo cual existen varios enfoques: genético, paisajista, geodinámico y morfométrico.

En el enfoque “genético” la subdivisión de la tierra en unidades fisiográficas se hace en base a factores genéticos (geología, geomorfología y clima), la desventaja de este enfoque es que los límites no están bien definidos presentándose áreas de transición. Este enfoque se ejemplifica con los trabajos de Christian y Stewart (1964) en Australia y Brinck (1965) en Sudáfrica.

Un segundo enfoque es el “paisajista” en el cual la delimitación de las unidades cartográficas se hace con el reconocimiento de paisajes, considerando al “paisaje” como la unidad estructural – funcional, resultado de la combinación de los procesos físicos y biológicos en constante evolución (Bertrand, 1968). Según Beckett y Webster (1962) estas divisiones son más convencionales que absolutas y el reconocimiento de los paisajes es válido gracias a los conceptos de reconocibilidad y reproducibilidad.

El enfoque “geodinámico” o “morfopedológico” fue propuesto por Tricart y Kilian (1982), con el objeto de llegar rápidamente a un diagnóstico global de la complejidad del medio y de los principales problemas de manejo y uso de

recursos. Este enfoque se basa en la premisa de que la formación y el desarrollo de suelos (pedogénesis) se encuentran estrechamente ligados al conjunto de fenómenos que modifican el relieve y degradan el suelo (morfogénesis), definiendo de este modo el nivel de estabilidad geodinámica del medio como resultado del balance morfogénesis/pedogénesis. La estratificación debe ser suficientemente flexible como para incorporar otras variables, como geoformas, tipo de material, vegetación, régimen hidrológico, uso del suelo. Una unidad morfopedológica (ecopedológica) presenta cierto grado de similaridad estructural, pedogenética, morfogenética, de uso y manejo. La principal ventaja de la regionalización morfopedológica es que permite la identificación de asociaciones de suelos que reflejan la distribución de los tipos de paisajes.

El enfoque “morfométrico” llamado también “paramétrico”, surge como una necesidad de describir la superficie terrestre de una manera precisa, exhaustiva, universal y ortogonal, de tal manera que sea posible distinguir las diferentes formas terrestres (Wood, 2004). En este contexto la descripción morfométrica se define como la parametrización de las formas de la superficie terrestre a partir de un conjunto de mediciones que permiten delinear las diferentes geoformas (Pike, 1988). Para esto se consideran dos aspectos principalmente, primero que los parámetros descritos sean óptimos para representar los procesos geomorfológicos, y segundo que el efecto de la escala en cuanto a reconocibilidad sea el mínimo posible (Wood, 2004). La aparición de nuevas tecnologías como los modelos de elevación digital (MED), permiten obtener información más precisa a un menor costo y en menor tiempo.

4. MATERIALES Y METODOS

4.1 AREA DE ESTUDIO

La región de estudio se ubica en los Andes Centrales, entre las coordenadas 15° y 16°50' latitud S, y 67° y 69°10' longitud W, cubriendo las provincias políticas de Larecaja, Murillo, Nor Yungas, Omasuyos, y Los Andes, todas pertenecientes al Departamento de La Paz en Bolivia (Fig. 1).

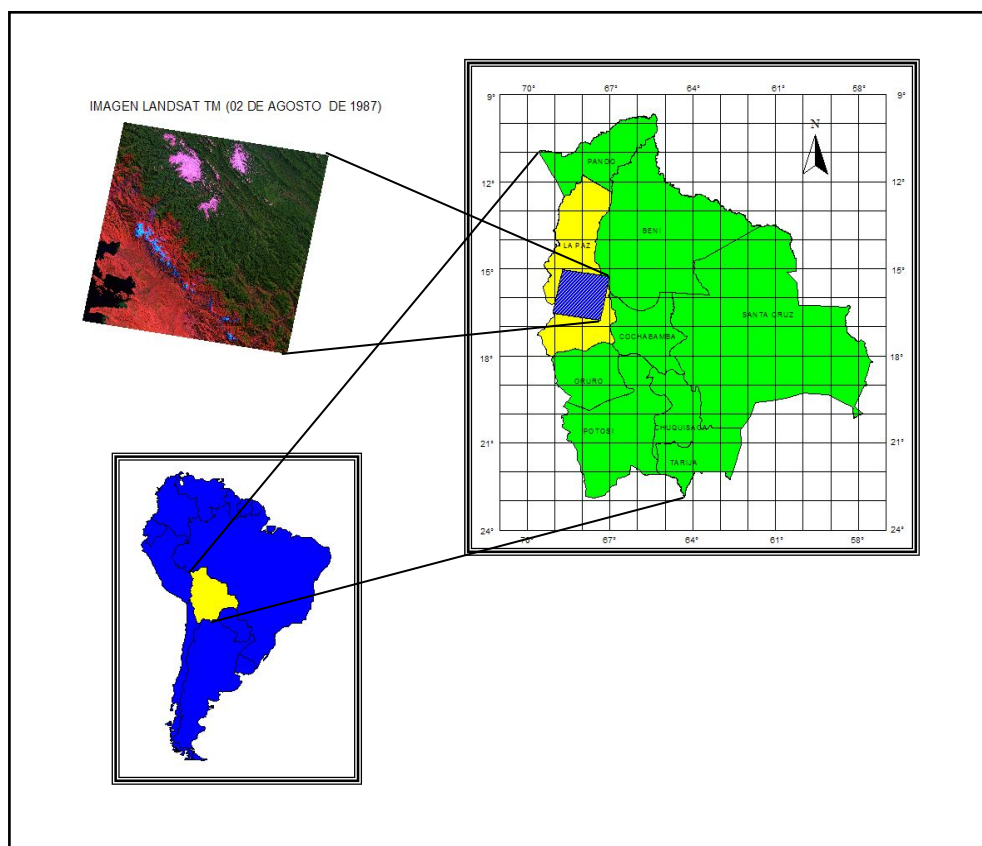


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.

4.1.1 Características fisiográficas del área de estudio

El área de estudio se caracteriza por una gran diversidad eco-fisiográfica con amplia variedad de climas, suelos y ecosistemas, extendiéndose desde la provincia fisiográfica del altiplano a 3,600 m.s.n.m., hasta la cordillera con altura máxima de 6,500 m.s.n.m. para descender hacia las tierras subtropicales (Yungas) y tropicales (subandino) con altura mínima de 200 m.s.n.m. La figura 2 muestra el perfil del área de estudio el cual fue elaborado a partir del modelo de elevación digital (ver resultados).

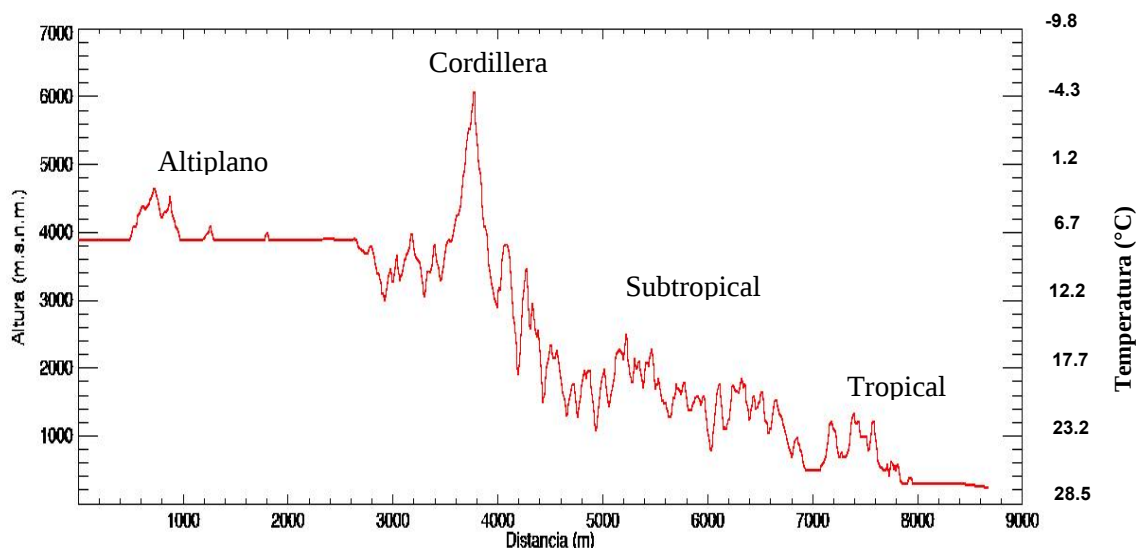


Figura 2. Perfil transversal del área de estudio mostrando las unidades eco-fisiográficas

4.1.2 Características climáticas del área de estudio

Cuatro estaciones meteorológicas ubicadas en las diferentes provincias eco-fisiográficas (El Alto en el altiplano, Coroico y Caranavi en la región subtropical y Sapecho en la región tropical) fueron utilizadas para la descripción del clima , sus características se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas de la región de estudio

Estación	Altura (m.s.n.m.)	Ubicación		Unidad eco- fisiográfica	Registros
		Latitud	Longitud		
El Alto	4,071	16° 31' S	68° 13' W	Altiplano	1949-2001
Coroico	1,650	16° 18' S	67° 36' W	Subtropical	1978-1997
Caranavi	625	15° 53' S	67° 33' W	Subtropical	1980-2001
Sapecho	400	16° 01' S	68° 42' W	Tropical	1964-2000

El clima de la región esta determinada principalmente por la temperatura, humedad relativa y precipitación, las cuales son analizadas a continuación.

a) Temperatura. La distribución de la temperatura durante el año es unimodal, las máximas se concentran entre noviembre y diciembre, y las mínimas entre junio y julio (Fig. 3). Las diferencias entre las mínimas y máximas se hacen más acentuadas sobre los 2,500 m.s.n.m., además de un incremento del riesgo de heladas. La oscilación de temperatura media anual es de 5.7°C en el altiplano y 4°C en la región tropical mientras que la oscilación entre el día y la noche es de 20°C para el altiplano y 18.8°C para el trópico. La tabla 2 muestra la distribución de las temperaturas medias máximas y mínimas para cada una de las estaciones meteorológicas localizadas en la región de estudio.

Tabla 2. Temperaturas de la región de estudio

Estación	Media	Mínima	Máxima	Oscilación	Desv. Std.
El Alto	7.7	5.5	9.3	3.8	1.4
Coroico	19.4	18.0	20.4	2.4	1.2
Caranavi	25.1	22.7	26.6	3.9	1.1
Sapecho	25.2	22.8	26.9	4.1	0.6

Debido a su ubicación tropical la radiación solar extraterrestre es elevada durante todo el año, la máxima se presenta en enero con 1,003.8 cal.cm⁻².día⁻¹

y la mínima en Julio con $573.6 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{día}^{-1}$ (Allen *et al*, 1998). La radiación neta disminuye 20 calorías por cada 1,000 m de aumento en la altura. Este gradiente influye directamente en la evapotranspiración potencial lo cual según Frère *et al* (1975), representa una disminución de 100 mm de evapotranspiración por cada 1,000 m de aumento de altitud.

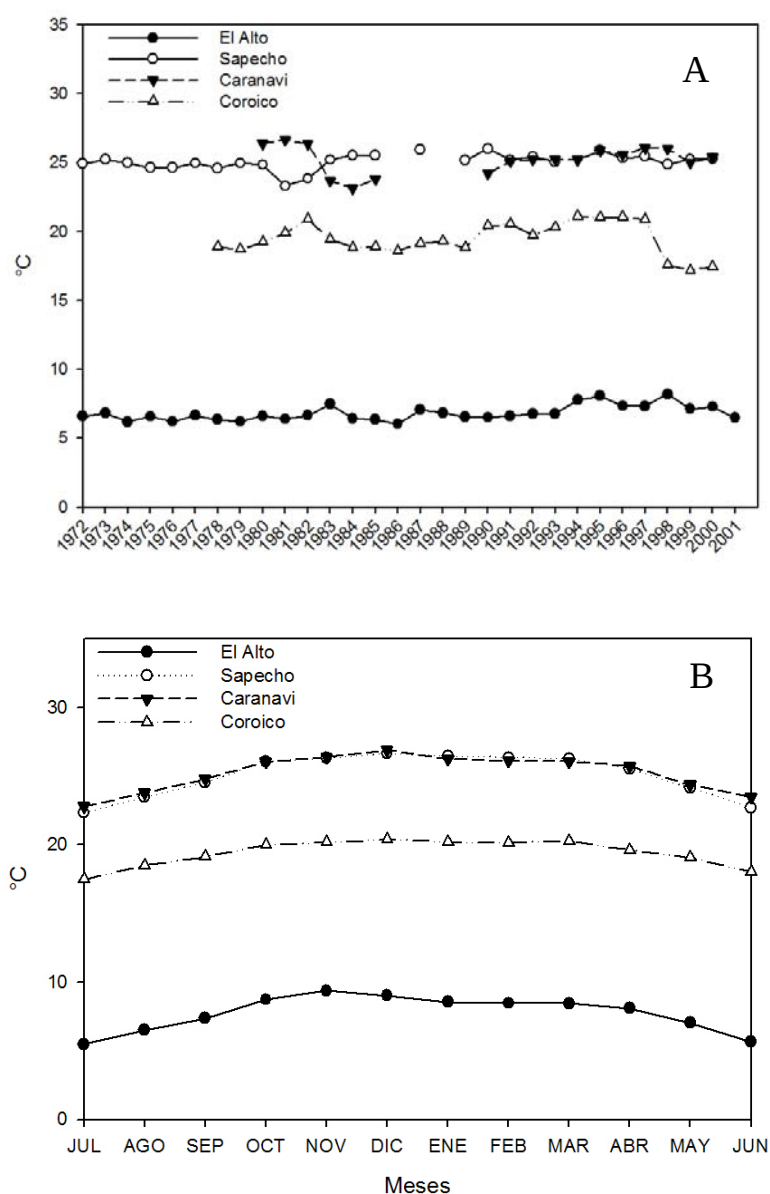


Figura 3. Comportamiento anual histórico (A) y distribución mensual (B) de las temperaturas medias en los Andes centrales bolivianos.

La figura 3(B) muestra que la variación de la temperatura para los últimos 30 años (de 1972 a 2002) fue más regular en la provincia del altiplano que en las provincias del subandino y yungas (región tropical y subtropical respectivamente) sin embargo el incremento de la temperatura media fue de 0.3°C a 0.5°C en todas las estaciones.

b) Precipitación. El clima es húmedo en verano y seco en invierno con la estación lluviosa de octubre a marzo. Según estudios realizados por la FAO no existe una relación directa entre la cantidad de precipitación y la altitud, esta relación solo es válida en áreas pequeñas con poca variación topográfica, y las diferencias de las precipitaciones están más asociadas a las frecuencias que a la intensidad (Frère *et al*, 1975). La cantidad y distribución de la precipitación permiten distinguir dos regiones, la región por encima de los 2,000 m.s.n.m. que comprende la cordillera y el altiplano, donde la precipitación es de 400 a 800 mm al año y la región por debajo de los 2,000 m.s.n.m. que corresponde a la zona de transición entre la zona montañosa y el amazonas con precipitaciones superiores a los 1,500 mm. Los valores mas bajos de precipitación se registran en el altiplano, donde la precipitación total anual es de 600 mm. La precipitación se incrementa hacia el oeste a medida que se aleja de la cordillera; las precipitaciones máximas anuales se observan en Coroico, Caranavi y Sapecho con 1,449 mm, 1,515 mm y 1,478 mm respectivamente.

La figura 4 muestra que la precipitación tiene una distribución unimodal; el máximo se presenta en enero con 133.1 mm en El Alto, 214.5 mm en Coroico,

219.9 mm en Caranavi, y 235.6 mm en Sapecho; el mínimo se presenta en julio en las cuatro estaciones.

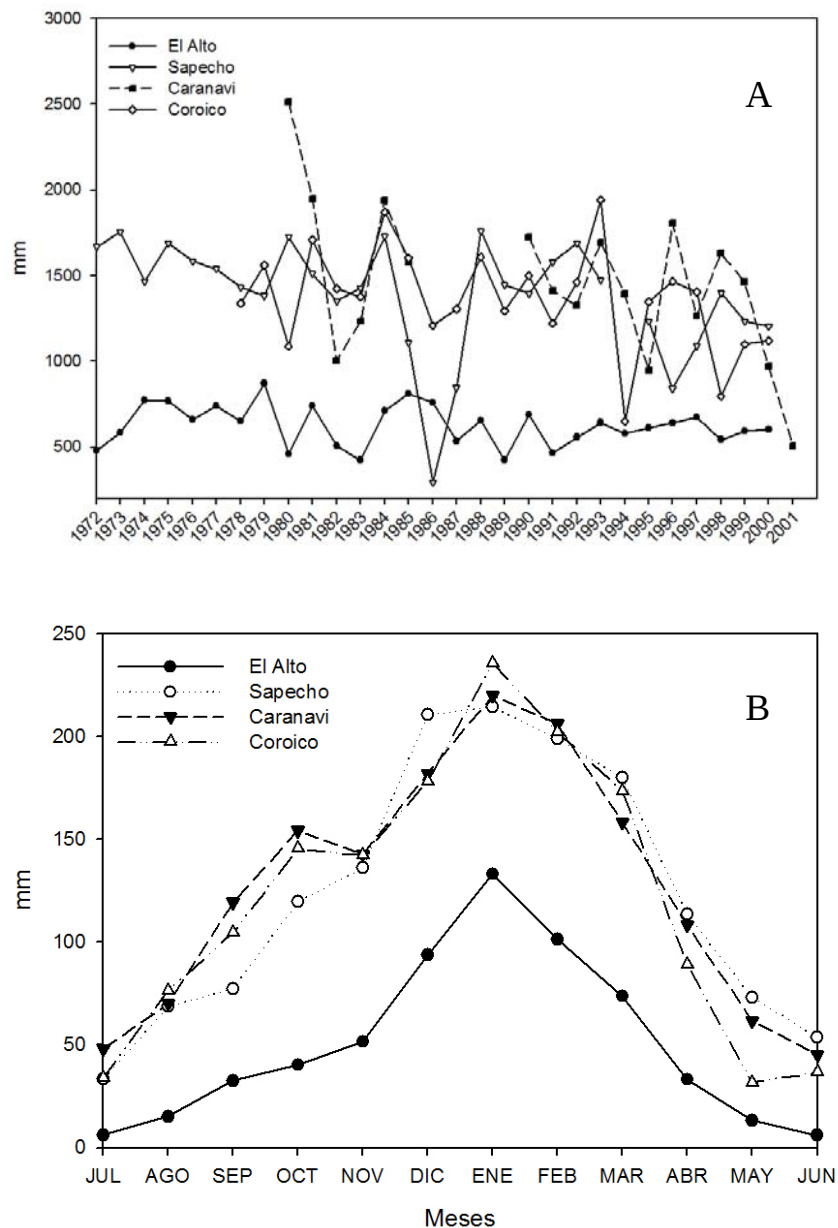


Figura 4. Comportamiento de la precipitación total anual histórica (A) y distribución mensual de la precipitación media (B) en los Andes centrales bolivianos.

c) Humedad relativa. Al igual que la temperatura, la humedad relativa disminuye con la altura; el gradiente de humedad relativa es de -0.53% por cada 100 metros de ascenso. La humedad relativa media anual es de 63% en la

estación El Alto, mientras que las regiones mas bajas presentan valores más altos, 80% en Caranavi, y Sapecho, y 88% en Coroico.

4.2 MATERIALES

4.2.1 Imágenes de satélite

Tres imágenes satelitales correspondientes a los años de 1972, 1987, y 2000 fueron utilizadas en el presente trabajo. La descripción de los sensores y las características de las imágenes mencionadas se muestran en la tabla 3,4 y 5.

Tabla 3. Características de los sensores

Satélite	Lanzamiento	Resolución				Altura (km)
		Espectral (bandas)	Espacial (metros)	Radiom. (bits)	Temp. (días)	
ERTS-1 MSS	23/07/72	4	80	8	18	917
LANDSAT TM	01/03/84	7	30	8	16	705
LANDSAT ETM+	12/1998	8	30(15,60)	8	16	705

Fuente: NASA, 2003

Tabla 4. Características espectrales de los sensores

Banda	Long. Onda (μm)	Región del espectro	Long. Onda (μm)		Región del espectro
	MSS		TM	ETM+	
1	0.5-0.6	Azul y verde	0.45-0.52	0.45-0.52	Azul
2	0.6-0.7	Rojo visible	0.52-0.60	0.53-0.61	Verde
3	0.7-0.8	Infrarrojo	0.63-0.69	0.63-0.69	Rojo visible
4	0.8-1.0	cercano	0.76-0.90	0.78-0.90	Infrarrojo cercano
5			1.55-1.75	1.55-1.75	Infrarrojo medio
6			10.40-12.50	10.40-12.50	Infrarrojo termal
7			2.08-2.35	2.09-2.35	Infrarrojo medio
8				0.52-0.90	Visible, infrarrojo cercano

Fuente: NASA, 2003

Tabla 5. Formato de las imágenes utilizadas

Satélite	Fecha	Tipo	Formato	Número de columnas	Número de hileras
ERTS-1 MSS	31/10/1972	Floating Point	BSQ	9110	8541
LANDSAT TM	02/08/1987	Byte	BIL	7735	6944
LANDSAT ETM+	07/11/2002	Floating Point	BIL	6600	6000

Fuente: Recopilación propia

4.2.2 Software para procesamiento digital y Sistemas de Información Geográfica

Para las correcciones y procesamiento digital de las imágenes se utilizó el software ENVI® Ver. 4.1 (2003) de RSI (*Research Systems Inc.*) y para la elaboración de mapas ARCINFO® (1985) y ARCVIEW® Ver. 3.2 (1999) de ESRI (*Enviromental Systems Research Institute Inc.*).

4.2.3 Cartas topográficas y mapas

Se adquirieron cuatro cartas topográficas 1:250,000 de la zona en formato digital y mapas temáticos de geología, suelo y vegetación a escala 1:250,000 y 1:100,000 (INE, 2002; CEDEFOA, 2001; IGM, 2000).

4.3 METODOS

4.3.1 Pre-procesamiento de imágenes

El pre-procesamiento consiste en la corrección de los errores radiométricos y geométricos ocasionados por el mal funcionamiento o calibración del sistema de detectores y por efecto de las condiciones atmosféricas.

4.3.1.1 Corrección radiométrica

Según Chander y Markham (2003) la corrección radiométrica es la remoción o disminución de las distorsiones en los valores de energía registrados por el sensor. Consiste en la conversión de los valores digitales a valores de reflectancia absoluta. Inicialmente se convierten los valores digitales (DN) en valores de radiancia espectral mediante una relación lineal (Ec. 1).

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{\max_{\lambda}} - L_{\min_{\lambda}}}{Q_{cal\max}} \right) \cdot Q_{cal} + L_{\min_{\lambda}} \quad (1)$$

Donde L_{λ} es la radiancia espectral media en la apertura del sensor medido en $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m$; Q_{cal} es el valor del píxel expresado en valor de número digital (DN); $Q_{cal\max}$ es el valor máximo del píxel (DN=255) que corresponde a $L_{\max_{\lambda}}$; $L_{\min_{\lambda}}$ es la radiación más baja medida por el detector en $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m$; $L_{\max_{\lambda}}$ es la radiancia medida en la saturación del detector en $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m$.

Los valores de radiancia espectral deben ser convertidos a valores de reflectancia terrestre para eliminar los errores debidos al efecto del ángulo zenital solar y valores elevados de radiancia en las bandas espectrales (Ec. 2).

$$\rho_P = \frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{E_{sun\lambda} * \cos(\theta_s)} \quad (2)$$

Donde ρ_P es la reflectancia terrestre; L_{λ} es la radiancia espectral media en la apertura del sensor en $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$; $E_{sun\lambda}$ es la irradiancia en el tope de la

atmósfera en $\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$ (Constante solar); θ_s es el ángulo zenital solar en grados y d es la distancia media de la tierra al sol en unidades astronómicas.

4.3.1.2 Corrección geométrica

El objetivo de la corrección geométrica es eliminar los errores no sistemáticos ocasionados por variaciones en la posición (rotación inclinación y desviación) y altitud del sensor (Jensen, 1996). Esta corrección consiste en la rectificación de la imagen original en base a una imagen ya corregida, a través de una interpolación espacial. Se identifican puntos de control (PCT o *GCP* por sus siglas en inglés) en la imagen corregida y en la imagen original y la distorsión entre ambos se determina mediante las ecuaciones 3a y 3b.

$$x_0 = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{11}xy + a_{20}x^2 + a_{02}y^2 + \dots + a_{ij}x^i y^j + \dots + a_{0t}y^t + a_{t0}x^t \quad (3a)$$

$$y_0 = b_{00} + b_{10}x + b_{01}y + b_{11}xy + b_{20}x^2 + b_{02}y^2 + \dots + b_{ij}x^i y^j + \dots + b_{0t}y^t + b_{t0}x^t \quad (3b)$$

Donde x, y son las coordenadas del punto de control en la imagen corregida, x_0, y_0 son las coordenadas del punto en la imagen sin corregir y $a_{00}, a_{10}, \dots, a_{ij}, b_{00}, b_{10}, \dots, b_{ij}$ son los coeficientes de la matriz de transformación.

A partir de la matriz de transformación se corrigen los errores de translación en x e y , cambios de escala en x e y , rotación y oblicuidad (Jensen, 1996). Estas ecuaciones asumen que después de la corrección las coordenadas de los

puntos de control originales y corregidas son iguales lo cual es imposible en la realidad, esta diferencia se calcula mediante el cuadrado medio del error (Ec. 4)

$$CME = \sqrt{(x' - x_{orig})^2 + (y' - y_{orig})^2} \quad (4)$$

Donde CME es el cuadrado medio del error, x', y' son las coordenadas del punto de control en la imagen sin corregir, x_{orig} , y_{orig} son las coordenadas de los puntos de control en la imagen corregida. Para este estudio se utilizó un polinomio de cuarto grado ($t=4$) con el cual se obtiene el menor valor de CME.

4.3.2 Caracterización de las unidades morfopedológicas

La caracterización morfopedológica se llevo a cabo mediante el uso de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación e información auxiliar de estudios anteriores. Estos tres componentes se combinan y las unidades morfopedológicas son descritas y organizadas en mapas fisiográficos (Fig. 5).

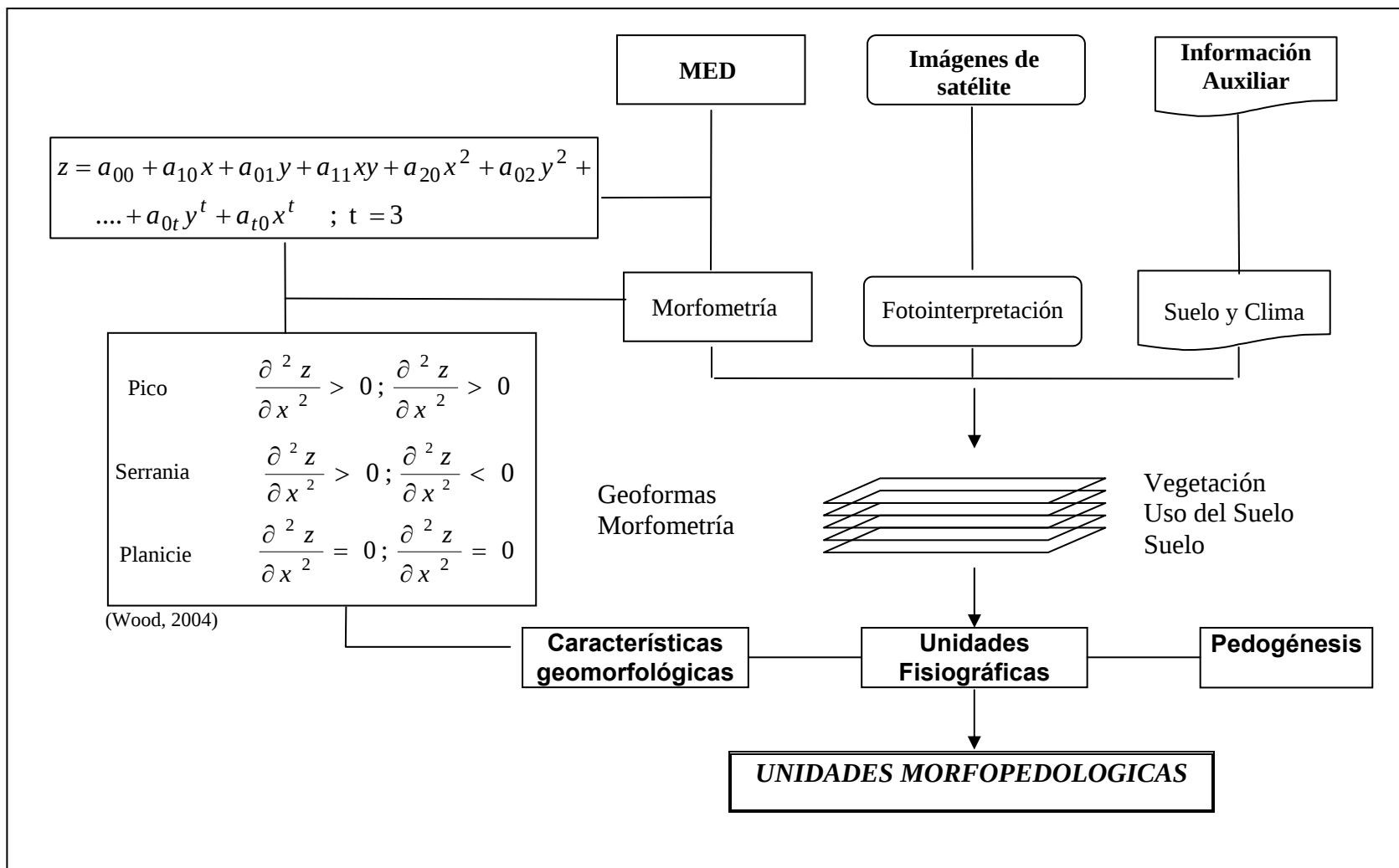


Figura 5. Metodología para la caracterización morfopedológica.

a) Fotointerpretación.- Se hace uso intensivo de la fotointerpretación para el reconocimiento de las características geomorfológicas y se definen las geoformas como unidades básicas de caracterización fisiográfica. La geoforma es la unidad geomorfológica más simple reconocible a partir de sus características fotogeológicas como forma, topografía, drenaje, rasgos de erosión, uso de tierra, vegetación, color y tono fotográfico. El reconocimiento de los patrones fotogeológicos se realiza en las imágenes satelitales mediante la siguiente secuencia de pasos. (Douglas, 1982).

1. La fotointerpretación se inicia con la formulación de una hipótesis sobre la composición geomórfica del sitio, se hace un reconocimiento somero de los diferentes patrones fotogeológicos.
2. En base a esta hipótesis se definen límites tentativos para separar las áreas con diferentes patrones.
3. A medida que se van examinando con más detalle los elementos visuales, la hipótesis es verificada y si es necesario modificada, con el apoyo de trabajos de campo o de estudios previos y se definen las unidades fisiográficas preliminares.
4. Cada unidad fisiográfica se divide en unidades morfopedológicas según las características más relevantes.
5. Finalmente las unidades morfopedológicas con características comunes se agrupan en unidades fisiográficas definitivas.

b) Morfometría.- Los MED (Modelos de Elevación Digital; *DEM* por sus siglas en inglés) se generan a partir de una función polinomial que modela la superficie terrestre, en la que la elevación es una función de las coordenadas (x,y). Para nuestro estudio se utilizó un modelo de grado tres (Ec. 5)

$$z = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{11}xy + a_{20}x^2 + a_{02}y^2 + \dots + a_{ij}x^i y^j + \dots + a_{0t}y^t + a_{t0}x^t; (t = 3) \quad (5)$$

Donde z es la elevación de cada punto en la superficie con coordenadas (x, y), a_{00} , a_{10} , ..., a_{0t} , a_{t0} son los coeficientes del polinomio. A partir de este modelo y los datos de elevación se derivan los atributos topográficos primarios de acuerdo con Wilson (2000) y Wood (2004) (Tabla 6). La pendiente, apariencia, curvatura transversal y longitudinal permiten inferir sobre algunas propiedades del terreno.

Tabla 6. Algunos atributos topográficos primarios, significado y expresión matemática. (Wilson, 2000; Wood, 2004)

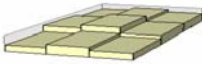
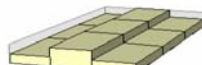
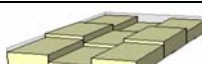
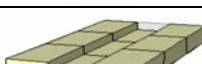
Atributo	Expresión matemática (*)	Significado
Pendiente	$pend. = \arctan \sqrt{(d^2 + e^2)}$	Velocidad de escorrentía superficial, precipitación, vegetación, geomorfología
Apariencia	$apa = \arctan \left(\frac{d^2}{e^2} \right)$	Distribución de la fauna y flora. Intensidad de radiación solar.
Curvatura (longitudinal y transversal)	$c_{long} = \left(\frac{ad^2 + be + cde}{d^2 + e^2} \right)$ $c_{trans} = -2 \left(\frac{bd^2 + ae^2 - cde}{d^2 + e^2} \right)$	Velocidad de Erosión y erosión, geomorfología, contenido de agua en la superficie.

*a,b,c,d y e son los coeficientes del modelo polinomial que se ajusta a la forma de la superficie.

Según Wood (2004) a partir de estos atributos se identifican las principales geoformas, la curvatura longitudinal y transversal son las más utilizadas por que están más relacionadas con los procesos geomorfológicos. Seis características

morfométricas (cumbres, serranías, canales, planicies, fosas y pasos) son descritas como expresión de la segunda derivada del modelo polinomial cuadrático que modela la superficie (Tabla 7).

Tabla 7. Método de calculo de las formas del terreno por maximización de la función z (Wood, 2004).

Geoforma	Expresión matemática	Forma terrestre
Cumbre	$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} > 0, \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} > 0$	
Serranía	$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} > 0, \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} < 0$	
Paso	$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} > 0, \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 0$	
Planicie	$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0, \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 0$	
Canal	$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} < 0, \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 0$	
Fosa	$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} < 0, \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} < 0$	

4.3.3 Clasificación de imágenes

Para el presente trabajo se utilizó el método de clasificación supervisada con el clasificador de “Máxima verosimilitud” el cual parte de un cierto conocimiento de la zona de estudio adquirido por experiencia previa, por trabajos de campo o a través de informaciones auxiliares para coleccionar sobre la imagen píxeles de entrenamiento. La media y varianza de las áreas de entrenamiento son utilizadas para estimar la media y varianza de las clases, y estimar la probabilidad de pertenencia de los píxeles a cada clase. Cada píxel se asigna a

la clase con mayor probabilidad de pertenencia. La secuencia que se sigue para la clasificación supervisada es la siguiente:

c) Definición de los píxeles de entrenamiento.- Se definen sobre la imagen grupos de píxeles estadísticamente homogéneos para cada tipo de uso y comunidad vegetal. Varios factores son tomados en cuenta en el proceso de colección de áreas de entrenamiento (Campbell, 1996), estos factores son los siguientes:

Pureza, el área donde se toman los píxeles de entrenamiento debe ser lo mas representativa posible de la característica a la cual esta representando.

Tamaño, un numero de 100 píxeles por muestra es aconsejable como mínimo para el sensor MSS de Landsat, este valor varía para los sensores TM y ETM+, Jensen (1996) aconseja que para un sensor con “n” bandas el número de píxeles por cada clase de entrenamiento debe ser $>10n$.

Localización, las clases de entrenamiento deben situarse de tal manera que reflejen la diversidad de toda la imagen y en lo posible en lugares que sean fácilmente reconocibles en un mapa o fotografía aérea.

El número de áreas de entrenamiento, depende del número de clases, se aconseja definir mas áreas de entrenamiento que clases para que toda la diversidad dentro de cada clase este representada. La secuencia para la elección de áreas de entrenamiento es como sigue:

- Recopilación de toda la información posible sobre el área de estudio.

- Reconocimiento preliminar de la imagen para determinar posibles zonas de entrenamiento.
- Definir posibles áreas de entrenamiento mediante digitalización en la imagen, formando grupos de píxeles estadísticamente homogéneos.
- Se verifica que las áreas de entrenamiento sean independientes, en caso contrario se eliminan las sobrepuestas y se vuelven a definir.

d) Clasificación de la imagen.- El método de máxima verosimilitud estima la probabilidad de pertenencia de un píxel desconocido a las clases de entrenamiento a través de la varianza y la correlación.

Explícitamente se usa un modelo de probabilidad del tipo normal para determinar los límites de decisión, se asume que las áreas de entrenamiento para cada clase en cada banda están distribuidas normalmente. Las áreas de entrenamiento con histogramas sesgados bi o trimodales no son ideales para una clase, porque estos sesgos representan clases individuales que deben ser entrenadas y etiquetadas como clases separadas (Erdas, 1996).

A partir del vector medio (M_c) para cada clase y la matriz de covarianza de clase c (V_c) para todas las bandas, se clasifica vector x de un píxel en una clase, la regla de decisión que se asume es, asignar el píxel x a la clase que tiene máxima probabilidad p_c :

$$p_c(a_c) \geq p_i(a_i), \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \text{ clases posibles} \quad (6)$$

$$p_c(a_c) = \ln(a_c) - 0.5 \ln[\det(V_c)] - [0.5(X - M_c)^T V_c^{-1} (X - M_c)] \quad (7)$$

Donde, $p_c(a_c)$ es la probabilidad de pertenencia del vector X a la clase c , X es el vector píxel de clase desconocida, M_c es el vector medio de la clase c , $\det(V_c)$ es el determinante de la matriz de covarianza V_c , a_c es una probabilidad a priori para un píxel que esta en la clase c .

4.3.4 Detección de cambio

Los cambios entre dos o más imágenes tomadas en diferentes fechas pueden ser cuantificadas a través de varias técnicas. Sin embargo es necesario tomar en cuenta algunas consideraciones para obtener resultados confiables. Las imágenes en los dos periodos deben ser en lo posible del mismo sistema de sensores de tal manera que tengan la misma resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal. Lo más aconsejable es que las imágenes por lo menos sean del mismo sistema, por ejemplo imágenes de la serie Landsat (Jensen, 1996). Las condiciones ambientales se constituyen en la principal dificultad para obtener resultados precisos en la detección de cambio (Singh, 1989), principalmente la variación de las condiciones atmosféricas, características fenológicas y contenido de humedad del suelo son los factores que más influyen en los valores de reflectancia (Mouat, 1993).

La aplicación de una determinada técnica de detección de cambio depende del objetivo de estudio. Más (1999) indica que el método de “comparación de imágenes clasificadas” es el más exacto para la evaluación de cambios en la

cobertura y uso del suelo, por que minimiza el efecto de la corrección radiométrica entre las imágenes, se tiene control sobre las clases que deseamos estudiar y permite analizar los cambios con más detalle en cada clase ya que la comparación es de píxel a píxel (Liu y Zhou, 2004, Coppin, 2004). La gran desventaja de este método es que la calidad del análisis es totalmente dependiente de la calidad en la clasificación individual, imágenes con errores en la clasificación mostrarán resultados erróneos.

La metodología se basa en la cuantificación de las diferencias entre las clases de cada imagen usando una imagen de cambio, en la cual se cuantifican las diferencias entre las clases de cada imagen píxel a píxel. La secuencia que se sigue según Jensen (1996) se muestra en la siguiente figura:

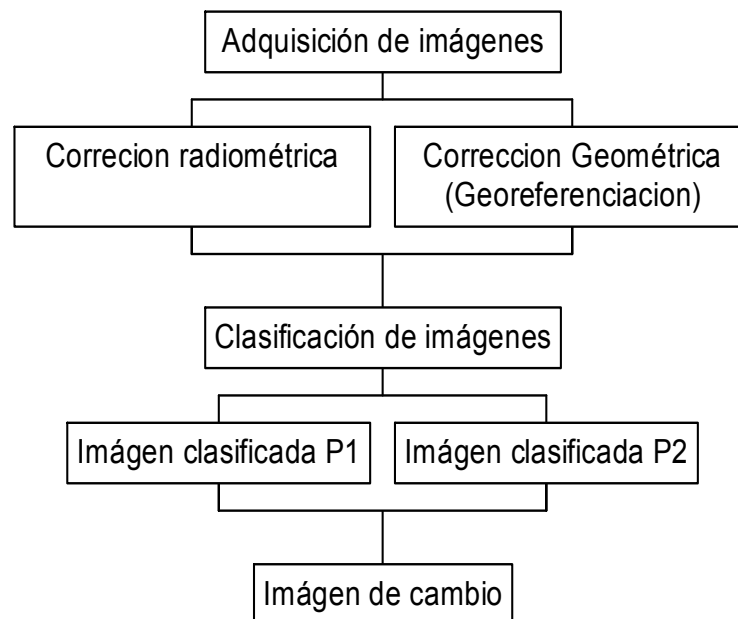


Figura 6. Metodología de detección de cambio mediante comparación de imágenes clasificadas (Jensen, 1996)

5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 PRE-PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES.-

La georeferenciación de las imágenes se realizó mediante el ajuste de la imagen a un modelo polinomial de cuarto grado, para lo cual se tomaron 52 puntos de control de terreno (PCT). Con estos PCT's el error promedio para las tres imágenes fue de 1.5m. La matriz de transformación con los coeficientes del modelo polinomial se muestra en la tabla 11 correspondiente a la imagen Landsat ETM+ del 7 de noviembre del 2002.

Tabla 8. Coeficientes de la matriz de la transformación para la imagen Landsat ETM+

Coeficientes de X					Coeficientes de Y				
-776.95	0.14	4×10^{-05}	-1.06×10^{-08}	0	317.81	0.93	-5×10^{-06}	3×10^{-10}	0
0.8477	0	-5×10^{-08}	0	0	-0.1208	0	6×10^{-09}	0	0
3×10^{-05}	0	0	0	0	-9×10^{-06}	0	0	0	0
-7×10^{-09}	0	0	0	0	2×10^{-09}	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

La corrección radiométrica fue llevada a cabo de acuerdo con Chávez (1996) y consistió en la conversión de los números digitales en valores de reflectancia absoluta eliminando los efectos atmosféricos.

5.2 CARACTERIZACIÓN AGRO-CLIMÁTICA Y PEDOClima

a) Evapotranspiración. La evapotranspiración es la fuente mas importante de perdida de agua para las plantas, su estimación es fundamental para

determinar los requerimientos hídricos de los cultivos. Los valores de evapotranspiración para la zona de estudio son muy variables debido a la diversidad de climas, la siguiente tabla muestra la evapotranspiración potencial mensual para cada una de las estaciones meteorológicas de referencia, calculado mediante el método de Penman-Montieth modificado por la FAO (Doorenbos y Pruitt, 1975).

Tabla 9. Evapotranspiración potencial media mensual (mm/día)

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Prom
El Alto	3.04	3.02	2.88	2.96	2.95	2.86	2.93	3.24	3.49	3.80	3.91	3.44	3.21
Coroico	3.29	3.19	3.33	2.84	2.40	2.30	2.36	2.81	3.12	3.54	3.74	3.81	3.10
Caranavi	4.44	4.44	3.96	4.00	3.52	3.16	3.43	3.92	4.37	4.87	4.52	4.47	4.10
Sapecho	4.16	4.02	3.90	3.57	2.95	2.51	2.83	3.60	4.28	4.73	4.55	4.42	3.80

Según los resultados anteriores no se observa una relación directa entre la evapotranspiración y la altura, las diferencias se deben mayormente a las fluctuaciones en la radiación neta. Los valores mas bajos se presentan en la región altiplánica, mientras que los valores mas altos se observan en las regiones bajas (Caranavi y Sapecho), para el caso de Coroico la evapotranspiración es menor a causa de la mayor nubosidad y alto contenido de humedad relativa durante todo el año. La distribución durante el año es unimodal con la máxima en noviembre para la región altiplánica, en diciembre para la región subtropical y en octubre para la región tropical, la mínima se presenta en junio para todas las estaciones.

b) Balance hídrico.- El cálculo del balance hídrico se determina mediante el método de Thornthwaite y Mather (1955) en el cual se parte de un valor máximo de capacidad de almacenamiento en el suelo y de acuerdo a los valores de

precipitación y evapotranspiración potencial se calcula la disponibilidad de agua durante el año mes por mes y se determina el periodo de déficit hídrico (D), recarga (R), exceso (E) y aprovechamiento (A) (Fig. 7).

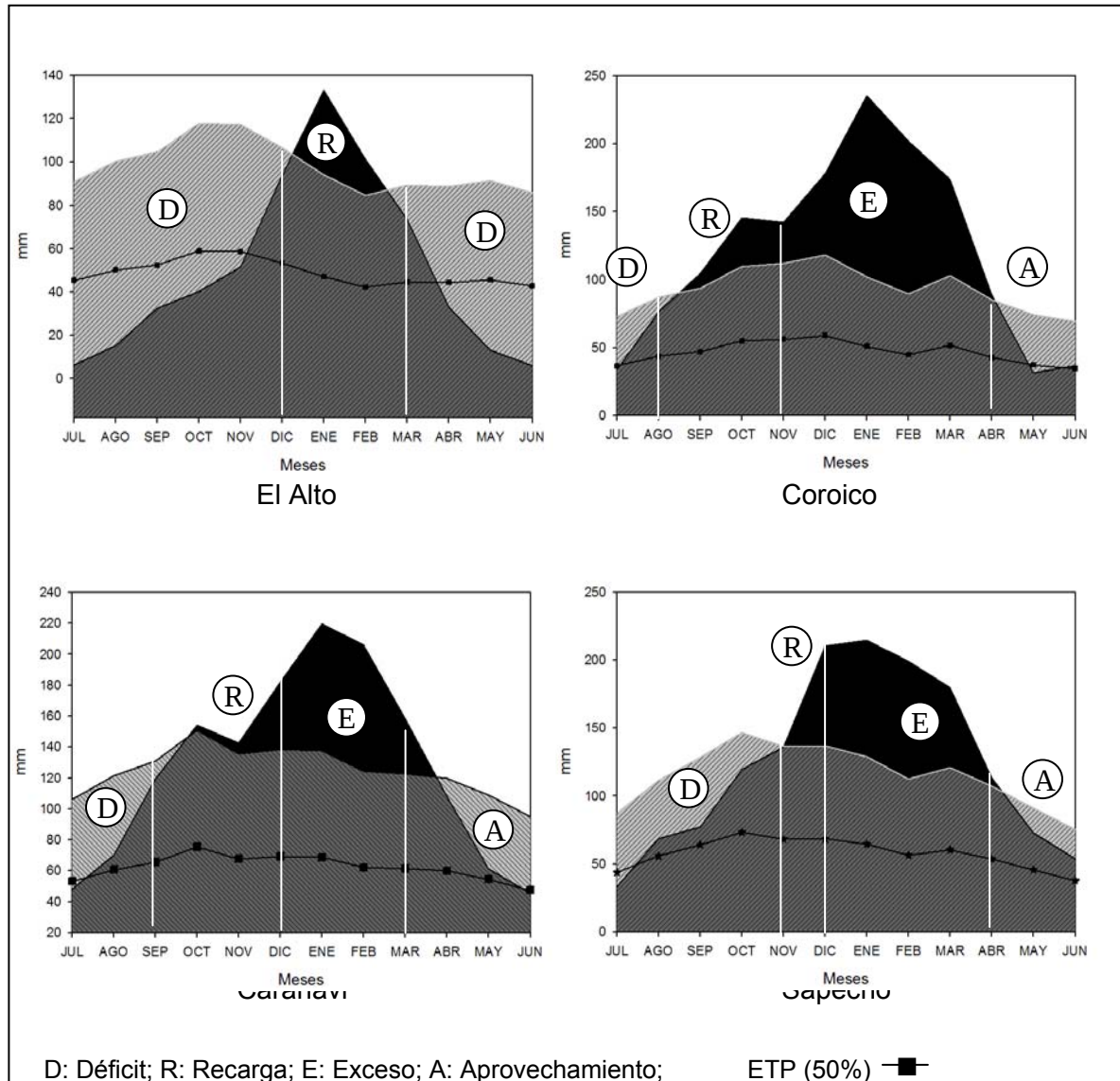


Figura 7. Balance hídrico para las estaciones de referencia.

La región altiplánica se caracteriza por presentar solo un periodo de déficit de nueve meses (marzo-noviembre) y otro de recarga de tres meses de diciembre a febrero (Fig 7). La región subtropical y tropical presenta un patrón diferente,

se observa un periodo de déficit de uno a tres meses entre julio a septiembre, a este le continua un periodo de recarga en cual el suelo recupera la humedad perdida hasta la máxima capacidad de almacenamiento, este periodo dura un mes para Sapecho y tres meses para Caranavi y Coroico. Después de que el contenido de humedad del suelo llega a su máximo y la precipitación sigue siendo mayor a la ETP se presenta el periodo de exceso que dura entre tres a cinco meses desde diciembre hasta abril. Finalmente los meses restantes entre mayo y junio se presenta el periodo de aprovechamiento.

c) Pedoclima. El régimen de humedad y de temperatura del suelo fue calculado según el modelo de NewHall (Wambeke, 2001) a partir de la temperatura y la precipitación media mensual, y opcionalmente la evapotranspiración potencial. Las características de pedoclima del área de estudio se muestran en la tabla 9.

Tabla 10. Régimen de temperatura y de humedad

Estación	Condición de humedad	Régimen	
		Humedad	Temperatura
El Alto	Seca (212 días)	Árido tropústico	Isomésico
	Húmedo (89 días)		
Coroico	Húmedo (todo el año)	Údico típico	Isohipertérmico
Caranavi	Húmedo (todo el año)	Údico típico	Isohipertérmico
Sapecho	Húmedo (332 días)	Údico típico	Isohipertérmico

El altiplano presenta un régimen de humedad “árido tropústico” y un régimen de temperatura isomésico. El régimen de humedad determinado corresponde al árido marginal al tropústico (el más húmedo de los áridos) en el cual la sección de control de humedad nunca se encuentra húmeda por más de 90 días consecutivos. El régimen de temperatura isomésico caracteriza los suelos con temperatura media anual entre 8°-15°C, y el prefijo “iso” se agrega cuando la

Tabla 11. Calendario de humedad del suelo

30

El régimen de humedad údico caracteriza los climas húmedos con lluvias bien distribuidas en todo el año además, la sección de control de humedad nunca se encuentra seca por más de 90 días acumulativos al año. El régimen de temperatura isohipertérmico se presenta cuando la temperatura media anual del suelo es superior a los 22°C y la diferencia de temperaturas medias del verano e invierno es menor que 6°C.

5.3 CARACTERIZACION MORFOPEDOLOGICA.-

5.3.1 Unidades fisiográficas y morfometría.-

La figura 8 presenta el modelo de elevación digital (MED) y un perfil transversal a través del mismo. Ambos MED y perfil muestran la distribución visual y las características del relieve de las principales (sub)provincias fisiográficas, y constituyeron una información auxiliar importante en la delineación de las unidades fisiográficas mediante la fotointerpretación de la imagen en pantalla usando los elementos de patrones y el software ENVI v. 4.1. Cinco provincias fisiográficas fueron identificadas, delineadas y descritas en términos de geoformas, características morfométricas, geología y estructura geológica: (I) altiplano, (II) unidades estructurales, (III) pie de montes, (IV) cordillera oriental, (V) subandino.

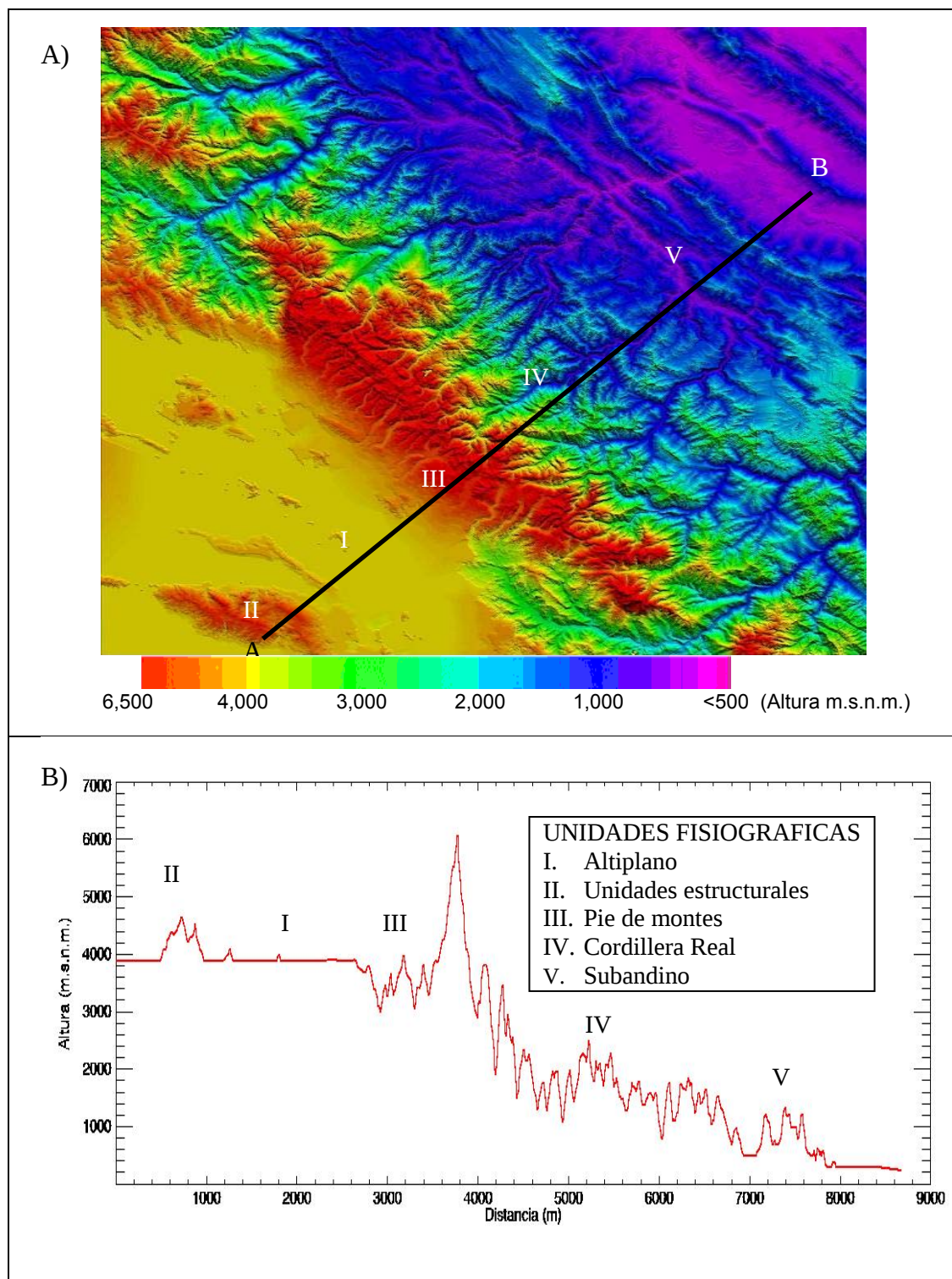


Figura 8. Modelo de elevación digital (A) y perfil transversal (B) trazado a lo largo de la línea AB

La figura 9 muestra el resultado de la clasificación morfométrica por (sub)provincia. Desde el enfoque morfométrico, tres tipos de relieve caracterizan el área de estudio; planicie, asociación de serranía/montañas, y valles, representados por los colores amarillo, azul y rojo respectivamente, de modo que el mapa morfométrico es un mapa de mosaico de estos tres colores. El altiplano esta representado con color amarillo, las unidades estructuras con colores azules, y el pie de monte, la cordillera y el subandino por un mosaico azul-rojo y amarillo de diferente densidad. A continuación se presenta una descripción de las cinco (sub)provincias.

Altiplano (I). El Altiplano es una cuenca endorreica de origen tectónico (o fosa tectónica) que surgió por un fallamiento en bloques. Se ubica entre las dos cordilleras, occidental y oriental, y tiene una altura promedio de 4,000 m.s.n.m. Geológicamente está conformada por sedimentos del cuaternario provenientes de las cordilleras que lo rodean. Presenta un relieve ondulado a semi-ondulado con pendientes ligeras o casi nulas ($<1\%$).

Unidades estructurales (II). Este grupo de formaciones de origen estructural son afloramientos de diferentes tipos de materiales ocasionados por numerosas fallas que dejan al descubierto los estratos geológicos profundos, formando serranías y colinas con alturas que oscilan entre 3,800 a 4,600 m.s.n.m. y pendientes medias a altas ($>3\%$). Los materiales que lo conforman predominantemente son areniscas y rocas volcánicas de diferentes edades geológicas.

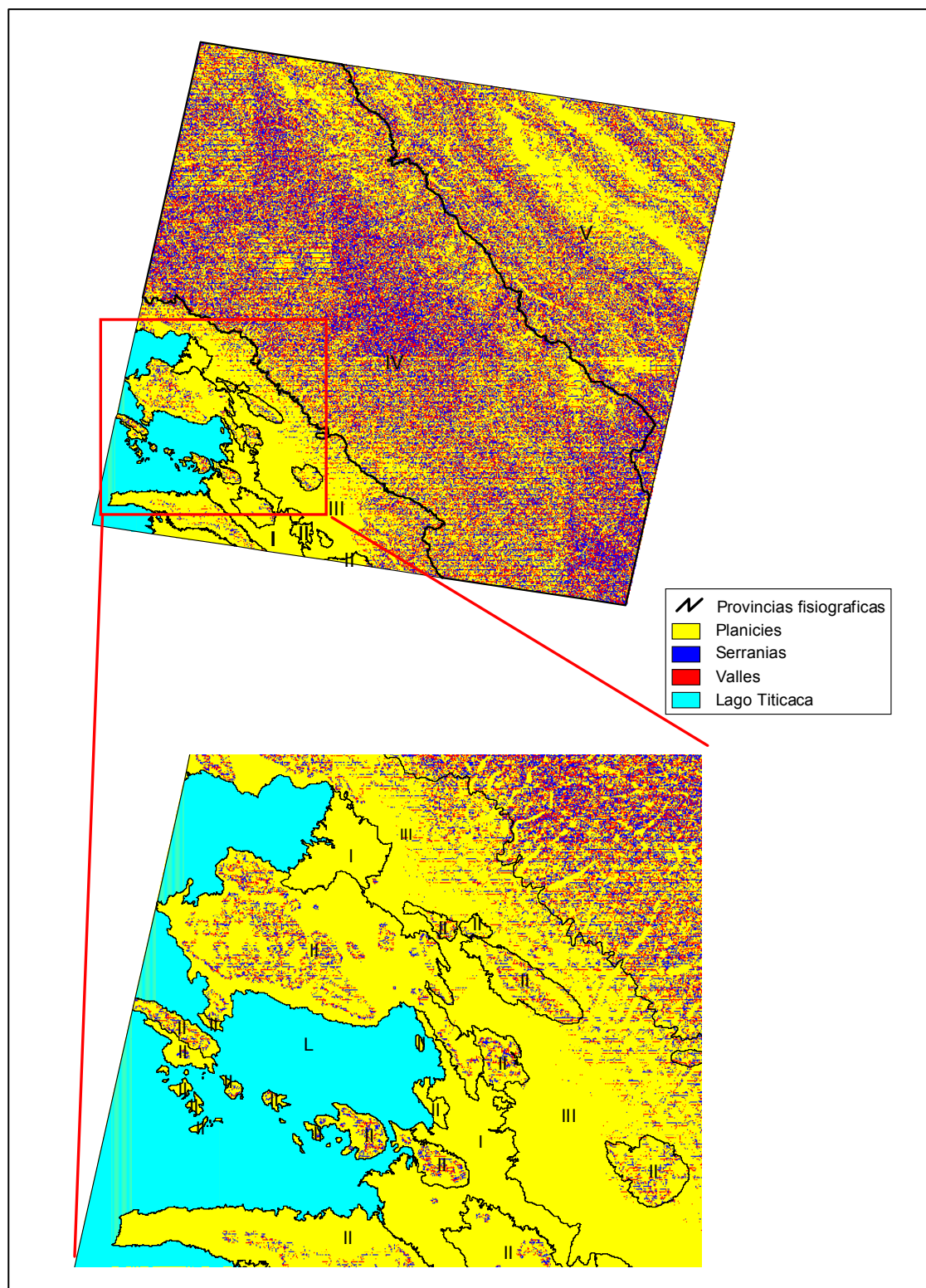


Figura 9. Superposición de la imagen morfométrica y mapa morfopedológico de los Andes centrales bolivianos.

Pie de montes (III). Consisten de conos de deyección o abanicos aluviales con pendientes que oscilan entre 5-10%. Según el mapa morfométrico esta unidad está dominada por una asociación de serranías y valles, y en las partes más bajas por planicies. Los materiales que lo componen son de origen fluvio-glaciar.

Cordillera oriental (IV). Consiste de cadenas montañosas y valles profundos fuertemente disectados con pendientes altas (>30%), modeladas por efecto de la erosión glaciar e hídrica. Predominan areniscas, cuarcitas, lutitas y limonitas, pertenecientes al paleozoico inferior (ordovícico).

Subandino (V). La provincia fisiográfica subandina está caracterizada por una secuencia de serranías, valles y planicies orientadas en forma paralela con dirección noroeste a sureste. Las pendientes oscilan entre 0-2% en la planicie, y 5-10% en las serranías y valles. Predominan rocas pertenecientes al paleozoico inferior (devónico, carbonífero, pérmico) y al mesozoico superior (cretácico).

5.3.2 Unidades morfopedológicas

Dieciocho unidades morfopedológicas fueron delineadas a partir de las cinco (sub)provincias fisiográficas anteriormente descritas.

I-1. Llanura fluvio-lacustre. Es una planicie conformada por depósitos lacustres y aluviones. Presenta un patrón de avenamiento subparalelo e interno. Esta subdividida en dos subunidades en base al tipo de drenaje interno, la primera I-

1a, frecuentemente inundable y la segunda I-1b, menos susceptible a la inundación con algunas afloraciones salinas. Los suelos tienen texturas que van de arenas finas a arcillas, sin presencia de grava ni piedra, pertenecen a los grandes grupos fluvent, tropacuent, fluvacuept y los subórdenes udult y acuult. La vegetación está compuesta de pastizales, totorales y matorrales. Medio geodinámico condicionalmente estable con erosión laminar ligera.

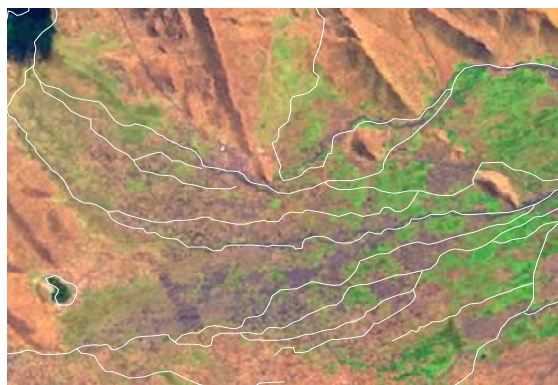


Figura 10. Fotogeología de la unidad I-1

I-2s. Llanura aluvial salina. Es una planicie conformada por aluviones, se observan ríos bien definidos aunque la red hidrográfica es poco desarrollada, patrón de avenamiento dendrítico, infiltración deficiente con afloramiento de sales. Los suelos son de textura franco arcillosa y pertenecen a los subórdenes salic y calcid. La vegetación es escasa del tipo matorrales y algunas especies halófitas como el kauchi (*Suaeda foliosa*), kota (*Anthobryum triandrum*) y liwi liwi (*Atriplex sp*). Es un medio geodinámico penestable con erosión laminar moderada a severa.

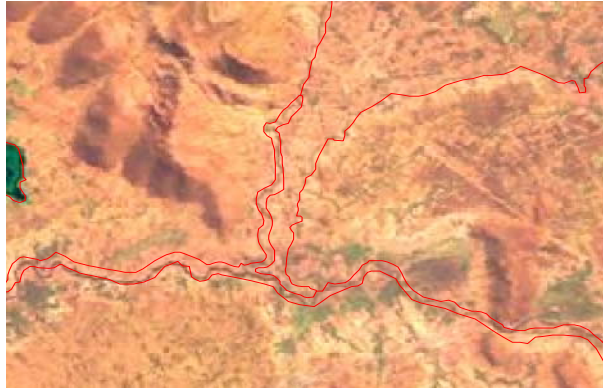


Figura 11. Fotogeología de la unidad I-2s

I-3d Humedales.- Áreas planas a ligeramente inclinadas (partes más bajas del pie de monte) con hidromorfismo de superficie. El estrato inferior de origen aluvio-coluvial está formado de materiales volcánicos y aluviones, sobre los cuales yacen suelos orgánicos hidromórficos (Hydric cryofibrists), y vegetación de bofedales con especies plurianuales. Los suelos presentan un régimen de humedad ácuico a péracuico y manifiestan procesos de acidificación o de alcalinización. Es un medio geodinámicamente estable. En las imágenes de satélite existen algunas subunidades de bofedales irregular y temporalmente saturadas con agua, especies plurianuales y anuales (Alzérreca, *et al.*



Figura 12. Fotogeología de la unidad I-3d

II-1p. Serranías y colinas del Paleozoico. El relieve se caracteriza por una secuencia de valles, serranías y planicies. Está conformado por lutitas, areniscas, calizas margas, cherts y limonitas. El patrón de avenamiento es del tipo dendrítico rectangular, con fuerte control litológico de la red hidrográfica. Los suelos son de textura franco-arenosa o arcillo-arenosa, muy superficiales con mucha pedregosidad; los órdenes que predominan son entisoles e inceptisoles y los subórdenes ortent y udept. Predomina la vegetación de matorrales y especies forestales exóticas, como el eucalipto (*Eucaliptus glóbulus*), pino radiata (*Pinus radiata*), ciprés (*Cupressus macrocarpa*) y álamo (*Populus alba*). Es un medio geodinámicamente inestable con erosión hídrica y eólica media a severa. En base a su composición geológica se describen tres subunidades, II-1pod formada por materiales pertenecientes al paleozoico inferior (ordovícica y devónica) que consisten de areniscas y lutitas, II-1pp constituida por formaciones del pérmico (calizas fosilíferas) y II-1pz del paleozoico no diferenciado (areniscas y limonitas).

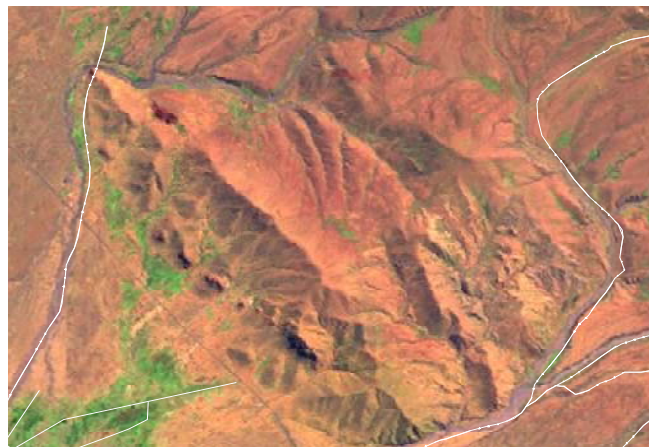


Figura 13. Fotogeología de la unidad II-1p

II-2m. Serranía del mesozoico. Relieve compuesto de serranías y valles, conformados por limonitas, arcillitas y areniscas localmente recubiertos por lava basáltica de coloración oscura. El patrón de avenamiento es del tipo dendrítico rectangular y angular, con fuerte control tectónico de la red hidrológica. Los suelos muy superficiales, de textura franco-arenosa o arcillo-arenosa, con mucha pedregosidad; los órdenes que predominan son entisoles e inceptisoles. La vegetación consiste de especies forestales exóticas, como el eucalipto (*Eucaliptus glóbulus*), pino radiata (*Pinus radiata*), ciprés (*Cupressus macrocarpa*) y álamo (*Populus alba*). Es un medio geodinámico inestable con erosión hídrica media a severa.

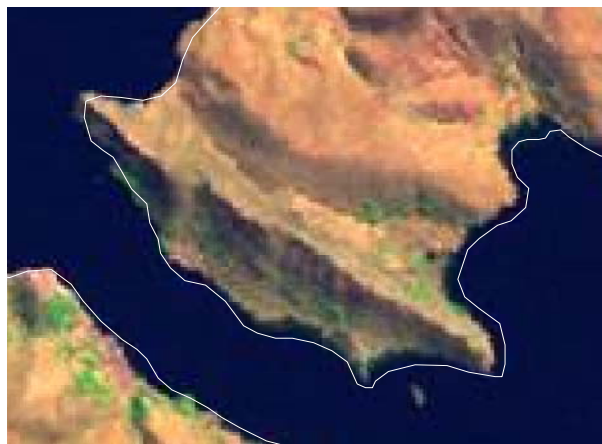


Figura 14. Fotogeología de la unidad II-2m

II-3a. Serranías plegadas. Relieve compuesto de serranías y valles conformados por conglomerados, areniscas, tobas y gravas polimícticas. Presentan un patrón de avenamiento del tipo rectangular y angular con control tectónico marcado. Los suelos son de textura franco-arenosa o arcillo-arenosa, muy superficiales con mucha pedregosidad, los ordenes que predominan son entisoles, e inceptisoles. La vegetación consiste de especies forestales

exóticas, como el eucalipto (*Eucaliptus glóbulus*), pino radiata (*Pinus radiata*), ciprés (*Cupressus macrocarpa*) y álamo (*Populus alba*). Es un medio geodinámico inestable con erosión hídrica media a severa.



Figura 15. Fotogeología de la unidad II-3a

II-3b. Domo volcánico residual. Relieve de serranías y valles, conformados por lavas volcánicas de diferentes composición. El patrón de avenamiento es del tipo radial fino. Los suelos de textura franco-arenosa o arcillo-arenosa, los ordenes que predominan son entisoles e inceptisoles. La vegetación consiste de especies forestales exóticas, como el eucalipto (*Eucaliptus glóbulus*), pino radiata (*Pinus radiata*), ciprés (*Cupressus macrocarpa*) y álamo (*Populus alba*). Es un medio inestable con erosión hídrica media a severa.

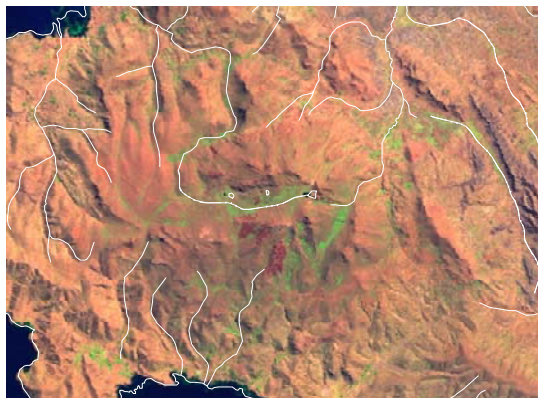


Figura 16. Fotogeología de la unidad II-3b

II-3c. Serranías del terciario. Relieve compuesto de serranías y valles conformados por conglomerados rojizos, areniscas, tobas, arcillas y gravas. El tipo de drenaje es del tipo rectangular y angular fuertemente controlado por fallas. Los suelos son de textura franco-arenosa o arcillo-arenosa y las clases de suelos predominantes son entisoles, e inceptisoles. La vegetación es formada por especies forestales exóticas, como el eucalipto (*Eucaliptus glóbulus*), pino radiata (*Pinus radiata*), ciprés (*Cupressus macrocarpa*) y álamo (*Populus alba*). Es medio geodinámico inestable con erosión hídrica laminar y en cárcava severa.

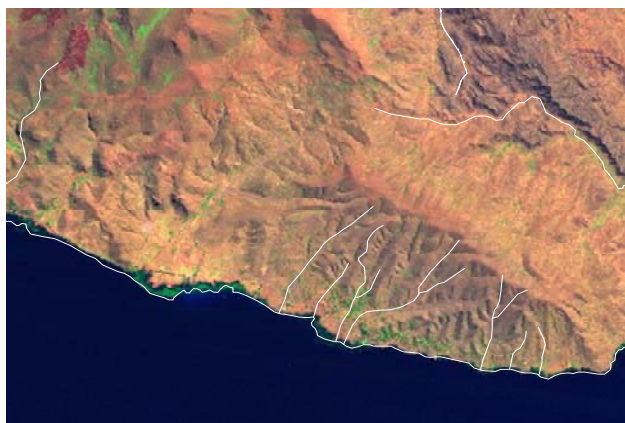


Figura 17. Fotogeología de la unidad II-3c

II-3d. Serranías del Mioceno. Relieve compuesto de serranías y valles conformados por conglomerados, areniscas arcillosas rojizas y tobas poco consolidadas. El patrón de drenaje es dendrítico fino con tendencia a paralelo. Los suelos son de textura franco-arenosa o arcillo-arenosa con abundante grava y piedra, los órdenes que predominan son entisoles e inceptisoles. La

vegetación es similar a las unidades estructurales anteriores. Es un medio geodinámico inestable con erosión hídrica en cárcavas.

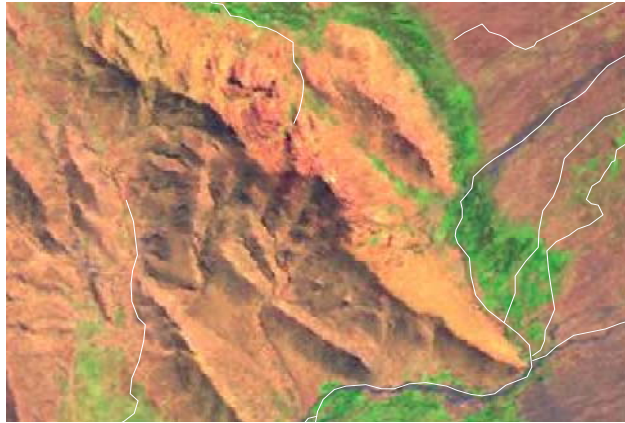


Figura 18. Fotogeología de la unidad II-3d

III-1 Pie de monte superior. Relieve consiste de planicies, serranías y valles con pendientes moderada (5-10%), conformados por conglomerados fluvio-glaciares y morenas terminales y laterales. El patrón de avenamiento es dendrítico paralelo y rectangular. Los suelos son superficiales a moderadamente profundos, con drenaje interno moderado a bien drenado, alta pedregosidad y poca rocosidad superficial, de textura franco-arenosos. Predominan los inceptisoles (udept). La vegetación consiste de arbustos xerofíticos, como leguminosas localmente llamadas añahuayas (*Adesmia miraflorensis* y *A. spinosissima*). Es un medio geodinámico penestable a inestable con erosión glacial e hídrica laminar y en cárcavas ligera a severa.



Figura 19. Fotogeología de la unidad III-1

III-2. Pie de monte inferior. Planicies conformadas por material aluvial, el patrón de avenamiento en (sub)abanico casi paralelo con riachuelos superficiales y temporales. Presentan pendientes casi planas a ligeramente inclinadas ($<5\%$). Los suelos son superficiales de textura franco-arcillo-arenosa y con mucha pedregosidad en la superficie, predominan los subórdenes ortent, udept, udalf. La vegetación está conformada por pastizales. Es un medio geodinámicamente penestable con erosión hídrica laminar y en cárcavas severas.

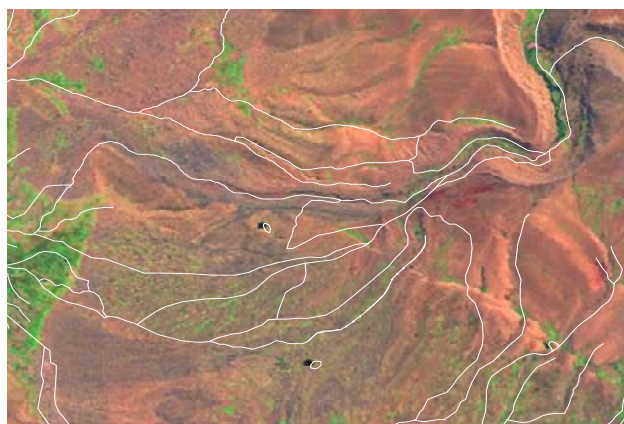


Figura 20. Fotogeología de la unidad III-2

IV-1. Macizo montañoso. Las geoformas son de tipo glacio-alpino en los que dominan montañas, valles y circos; el flanco noroeste de la cordillera presenta artesas glaciares con perfil longitudinal en forma de “v” y “u” y numerosas lagunas escalonadas. En el flanco sureste aparecen restos de morenas, valles en “u” y lagunas de mayor tamaño. La geología consiste principalmente de granodiorita, areniscas, cuarcitas, pizarras, lutitas y limonitas, morenas. El patrón de avenamiento es del tipo dendrítico angular medio con fuerte control estructural y tectónico. Los suelos son superficiales con mucha pedregosidad superficial y afloramientos rocosos, y clasificados como ortent y udept. La vegetación es herbácea, escasa y dispersa con presencia de algunas especies como *Senecio apolobambensis*, *S. modestus*, *S. canesens*, *S. violaefolius*, *Valeriana sp.* *Urtica echinata*, y *Trisetum spicatum*. Es un medio geodinámicamente inestable con erosión hídrica y glacial severa.

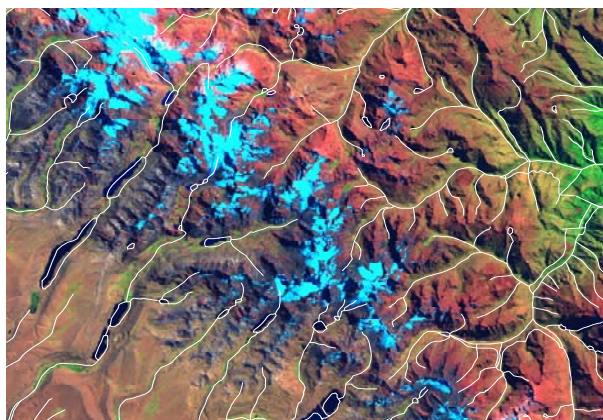


Figura 21. Fotogeología de la unidad IV-1

IV-2. Yungas. El relieve está compuesto por una secuencia de montañas y valles profundos, conformado por areniscas, cuarcitas y lutitas. El patrón de

avenamiento es dendrítico típico medio, en el cual los tributarios están fuertemente controlados por la litología, se observan valles en forma de “v” muy profundos. Los suelos son muy superficiales, con textura que va de franco a franco limosos, presencia de fragmentos de pizarras. Los subórdenes que predominan son tropept y fibríst. La vegetación corresponde a un bosque húmedo montano. Es un medio geodinámico penestable con erosión hídrica severa.



Figura 22. Paisaje y fotogeología de la unidad IV-2

IV-3. Yungas interandinos.- El relieve esta compuesto de montañas y valles profundos, conformados por areniscas, cuarcitas, limonitas y afloramiento de pizarras. Dos unidades son delimitadas, IV-3a con patrón de avenamiento del tipo dendrítico rectangular medio, con un control estructural de la red hidrográfica, y IV-3b con patrón de avenamiento dendrítico subparalelo medio.

Los suelos son predominantemente muy superficiales (10 cm a veces hasta 150 cm), presentan textura franco a franco arcillosa con fragmentos rocosos en los primeros horizontes, y son clasificados como ortent, udept y fibríst. La vegetación se caracteriza por la abundancia de especies maderables y de palmeras, el sotobosque está compuesto de especies xerofíticas. Es un medio geodinámicamente penestable con erosión hídrica y laminar.

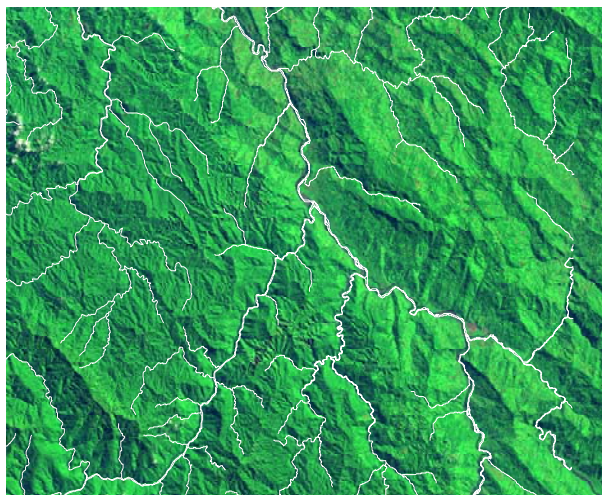


Figura 23. Fotogeología de la unidad IV-3

V-1. Montañas plegadas subandinas.- Relieve consiste de planicies, canales y serranías, conformados por areniscas, areniscas conglomerádicas con nódulos de pedernal, calizas, margas, arcillitas y conglomerados. El patrón de avenamiento es del tipo mixto con predominancia de angular dendrítico debido a las múltiples fracturas y fallas producidas por los plegamientos. Los suelos son moderadamente profundos, fluctuando entre limo arenosos, arcillo-limosos y arcillosos. Los subórdenes predominantes son ortent y udept. La vegetación está conformada por especies maderables como *Chusquea boliviana* y *Acalipha macrostachya*. La vegetación cultivada consiste de cultivos anuales y

permanentes. Es un medio geodinámico penestable con erosión hídrica laminar moderada y en surcos.



Figura 24. Fotogeología de la unidad V-1

V-2. Serranía plegada de Alto Beni. Serranías alargadas y paralelas separadas por planicies y valles orientados de NW a SE. La geología está conformada por areniscas, areniscas conglomerádicas con nódulos de pedernal, calizas, margas, arcillitas y conglomerados. Los ríos son meándricos debido al control ejercido por riscos y colinas. En los sinclinales más angostos el patrón de avenamiento es del tipo rectangular, mientras que en los amplios es angular dendrítico subparalelo medio. Los suelos son de textura arcillo-limosa clasificados en los subórdenes: ortent, udox, udept, udult, fluvent. La vegetación es del tipo bosque denso, húmedo, siempre verde, con especies maderables como *Mezilaurus itauba*, *Ceiba petandra*, *Swetenia macrophylla*, palmeras y cultivos como banano, café y cítricos. Es un medio geodinámicamente inestable con erosión hídrica laminar y en surcos.

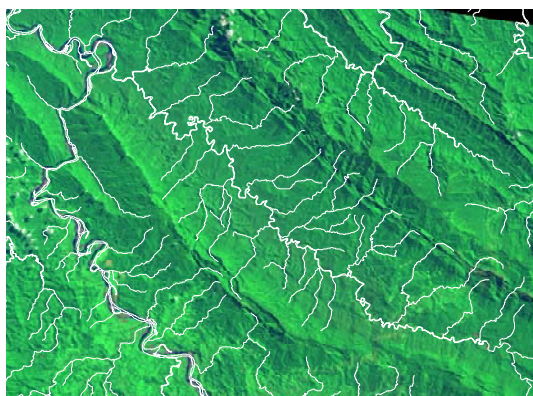


Figura 25. Fotogeología de la unidad V-2

V-3. Llanura de Alto Beni.- Es una planicie de origen aluvial, el drenaje superficial es mayormente interno debido a que los sedimentos son de textura limo arenosa fina a limosa, y de consistencia suelta. Los ríos principales están bien definidos y presentan un patrón de avenamiento anastomosado. Los suelos son moderadamente profundos fluctuando entre limo-arenosos a arcillosos, los horizontes superiores son bien drenados aunque muchos lugares muestran el horizonte B moteado con concreciones ferruginosas. Están clasificados en los subórdenes fluvent, udept, psamment y ortent. La vegetación original corresponde a un bosque perhúmedo montano siempre verde, también se encuentran cultivos como banano, café y cítricos. Es un medio geodinámicamente estable.

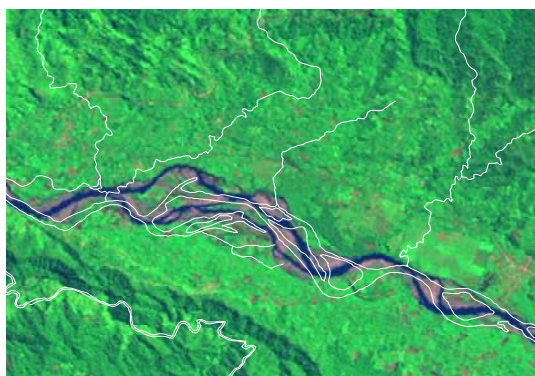


Figura 26. Fotogeología de la unidad V-3

La descripción de cada una de las 20 unidades morfoedológicas y el mapa morfoedológico de la resgion de estudio se muestran en la figura 27.

5.3.3 Vegetación y Uso del suelo

Nueve tipos de uso de suelo fueron clasificados en las imágenes de satélites de 1987 y 2002. Estos incluyen vegetación, agua, nieve, roca, suelos desnudos, suelos salinos, aluviones, totorales y bofedales (Fig. 28 y 29).

La vegetación aparece en la imagen clasificada con color verde oscuro, y comprende al bosque húmedo tropical siempre verde, bosque secundario, pastizales y cultivos. El área con vegetación natural predomina en las (sub)provincias Yungas y Subandino. La vegetación secundaria incluye pastizales, cultivos y bosques secundarios, y predomina en Alto Beni. Los afloramientos rocosos dominan en la cordillera oriental, unidades estructurales y en el subandino como consecuencia de la deforestación y uso agrícola de los bosques. En las figuras 28 y 29 los afloramientos rocosos aparecen con color café.

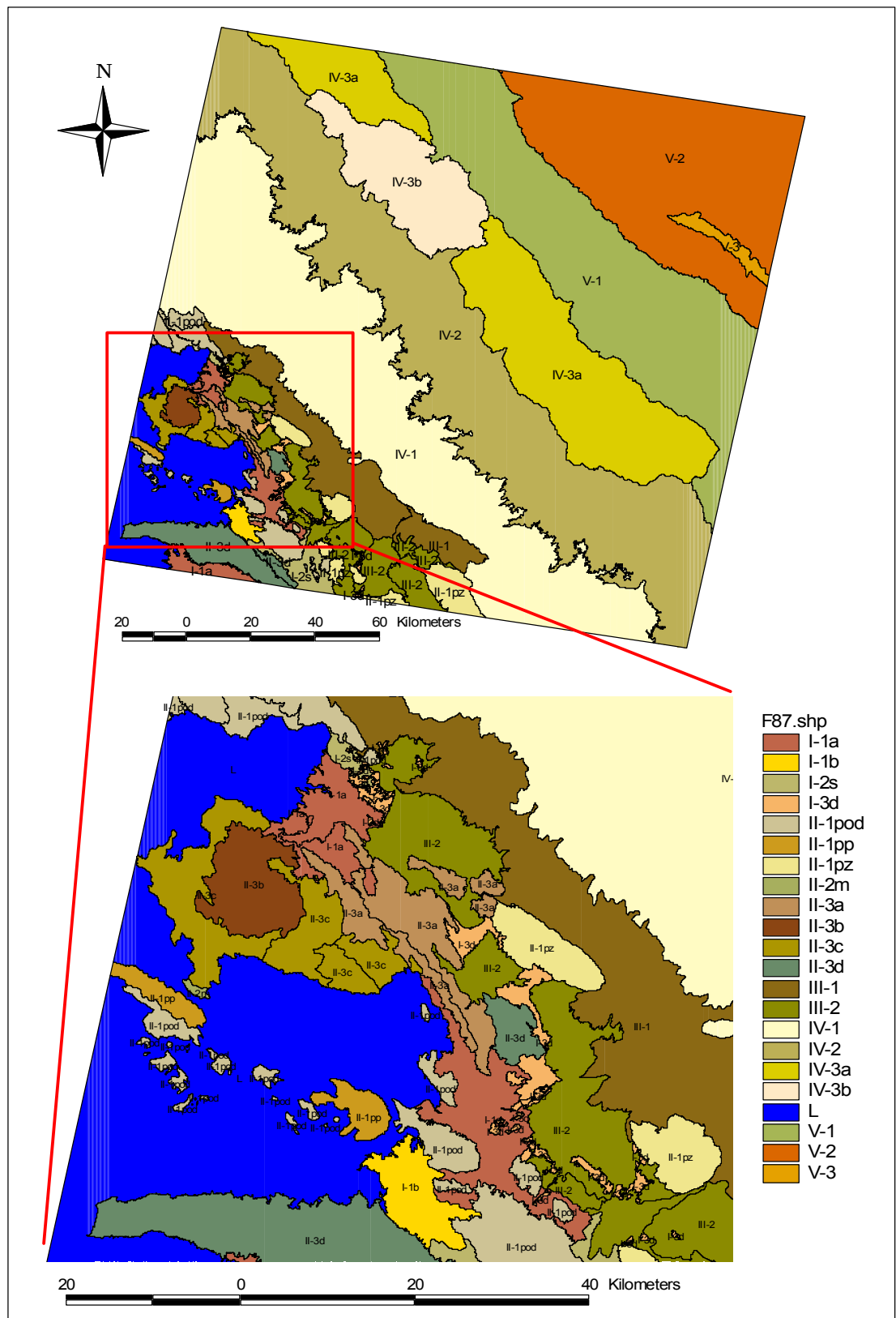


Figura 27. Mapa morfopedológico de los Andes centrales bolivianos

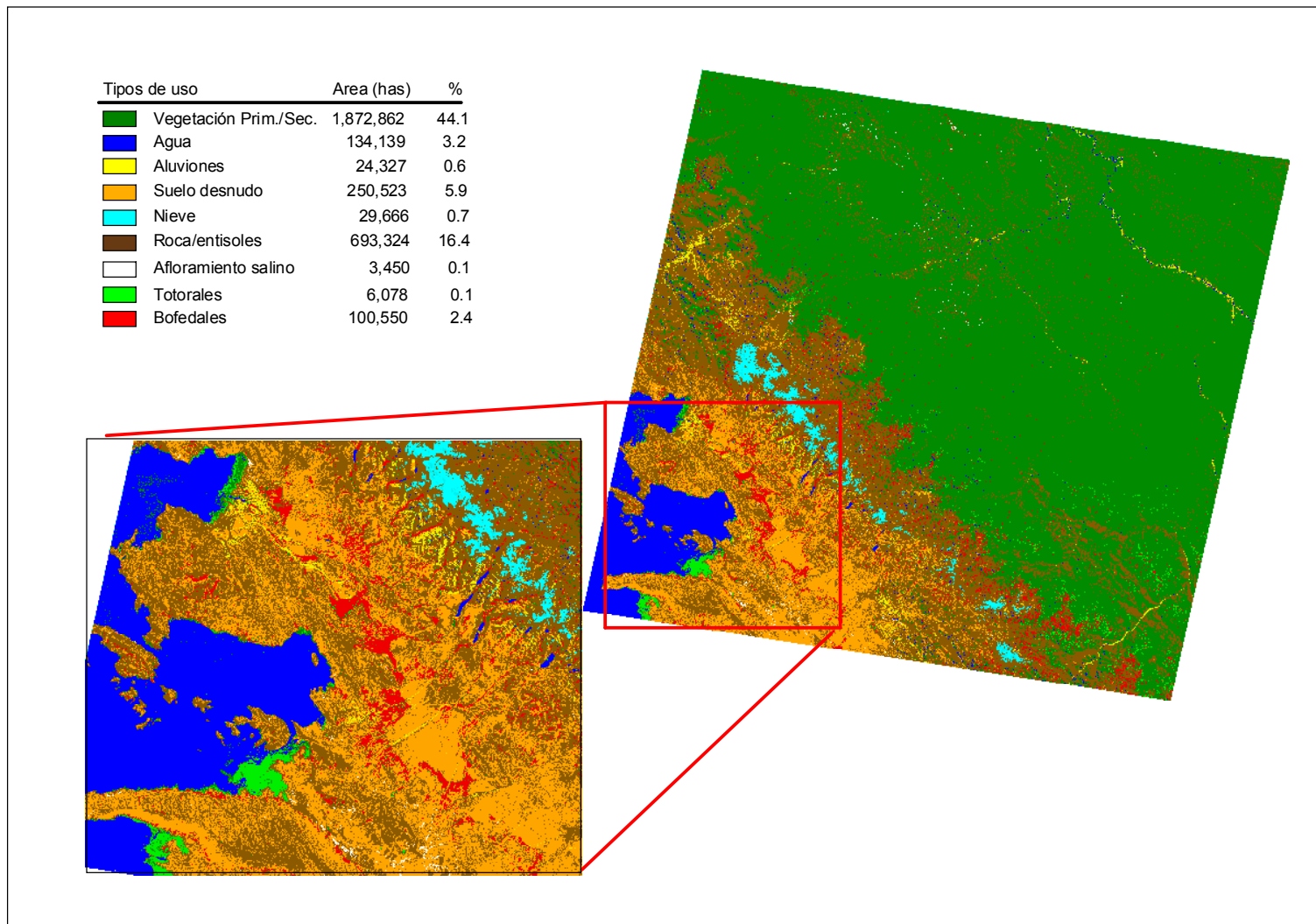


Figura 28. Uso de Suelo a partir de la imagen Landsat TM (1987)

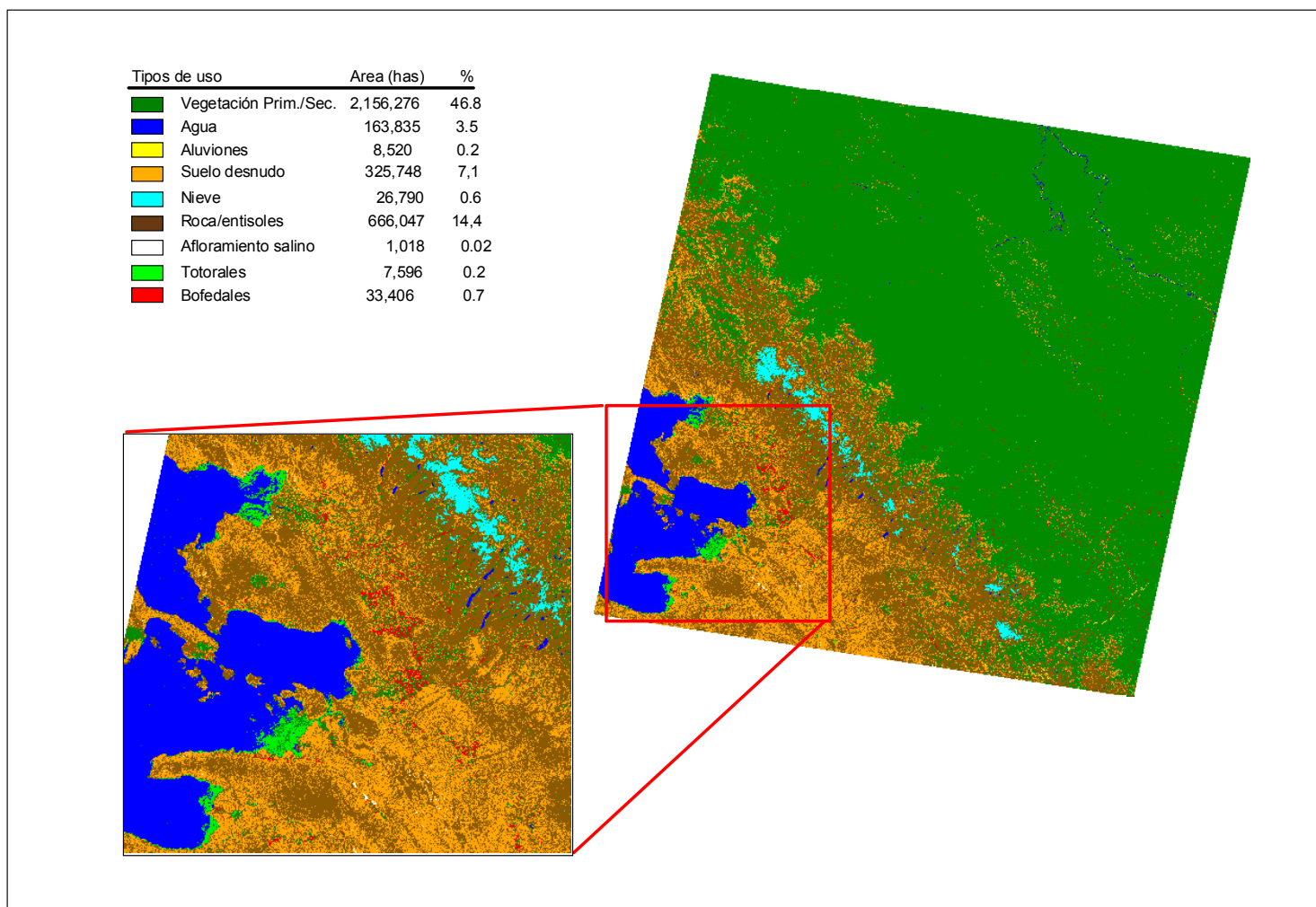


Figura 11. Mapa de tipos de uso de suelo para la imagen Landsat ETM+

La mayor proporción de los suelos desnudos se ubican en el altiplano y en las regiones deforestadas de la provincia fisiográfica del subandino (Alto Beni). Predominan los subórdenes fluvent y acuent en el altiplano y ortent, tropept y udult en Alto Beni. Suelos con afloramientos salinos se ubican principalmente en llanuras aluviales con drenaje deficiente.

Los bofedales son praderas nativas siempre verdes que caracterizan los suelos húmedos ubicados en las depresiones topográficas en el altiplano y pie de montes (Alzérreca *et al*, 2001). Los totorales son asociaciones de especies acuáticas de agua dulce ubicados en las riveras del lago Titicaca; están compuestos principalmente de totora (*Schenoplectus totora*) y llachus (*Elodea potamogeton*).

La precisión de la clasificación de las imágenes fueron muy altas arriba del 96%, y el coeficiente kappa fue de 0.93 a 0.95 para las imágenes Landsat TM y ETM+ respectivamente (Tablas 12 y 13).

Tabla 12. Matriz de error de la clasificación de la imagen Landsat TM (02/08/1987)

Tipo de uso	1	2	3	4	5	6	7	8	9	TOTAL
1 Vegetación	199,893	21	0	14	0	0	0	191	73	200,192
2 Agua	15	5,421	0	125	0	0	0	0	1	5,562
3 Suelo	0	0	13,636	300	0	0	0	0	0	13,936
4 Roca	3	16	885	12,488	49	0	0	2	7	13,450
5 Nieve	0	5	0	70	16,586	0	0	0	0	16,661
6 Suelo salino	64	0	1	0	0	309	0	0	0	374
7 Aluviones	0	0	0	0	0	0	281	0	0	281
8 Totorales	36	1	0	1	0	0	0	10,811	79	10,928
9 Bofedales	0	1	0	1	0	0	0	0	14,406	14,408
TOTAL	200,011	5,465	14,522	12,999	16,635	309	281	11,004	14,566	275,792
Precisión general	97,55%									
Coef. Kappa	0,95									

Tabla 13. Matriz de error de la clasificación de la imagen Landsat ETM (07/11/2002)

Tipo de uso	1	2	3	4	5	6	7	8	9	TOTAL
1 Vegetación	102,576	0	0	20	0	0	0	0	80	102,676
2 Agua	0	6,468	0	0	0	0	0	0	0	6,468
3 Suelo	3	0	10,498	67	0	0	0	0	5	10,573
4 Roca	0	16	131	4,414	5	0	0	0	0	4,566
5 Nieve	0	0	0	14	3,725	0	0	0	0	3,739
6 Suelo salino	0	0	0	0	0	664	0	0	0	664
7 Aluviones	0	0	0	10	0	0	175	0	0	185
8 Totorales	0	0	0		0	0	0	1,859	1	1,860
9 Bofedales	12	9	0	1	0	0	0	8	10,024	10,054
TOTAL	102,591	6,493	10,629	4,526	3,730	664	175	1,867	10,110	140,785
Precisión gral.	96,60%									
Coef. Kappa	0,93									

Debido a la mala calidad de la imagen ERTS-1 MSS del 31/10/1972 aunado a su baja resolución espectral y espacial, la calidad de su imagen clasificada no era lo suficientemente bueno para garantizar un buen análisis de cambio por lo que no fue considerado para tal propósito.

5.4 ANALISIS DE CAMBIO

5.4.1 Cambios en el nivel del lago Titicaca

La figura 30 muestra una superposición de los contornos vectoriales del lago Titicaca en el lado de Bolivia para los años 1987 y 2002. La superposición de estos dos vectores permitió evidenciar visualmente el área de cambio que estaba cubierto con agua en 1987 y que en 2002 correspondió a una llanura aluvial reciente. El área de cambio calculado mediante una simple diferencia de superficie de los polígonos en las tablas de atributos fue de 8,605.5 has, lo que equivale a varios millones de metros cúbicos de agua (si la profundidad media

del agua fuese 1m, el volumen del agua equivaldría a 86 millones de metros cúbicos).

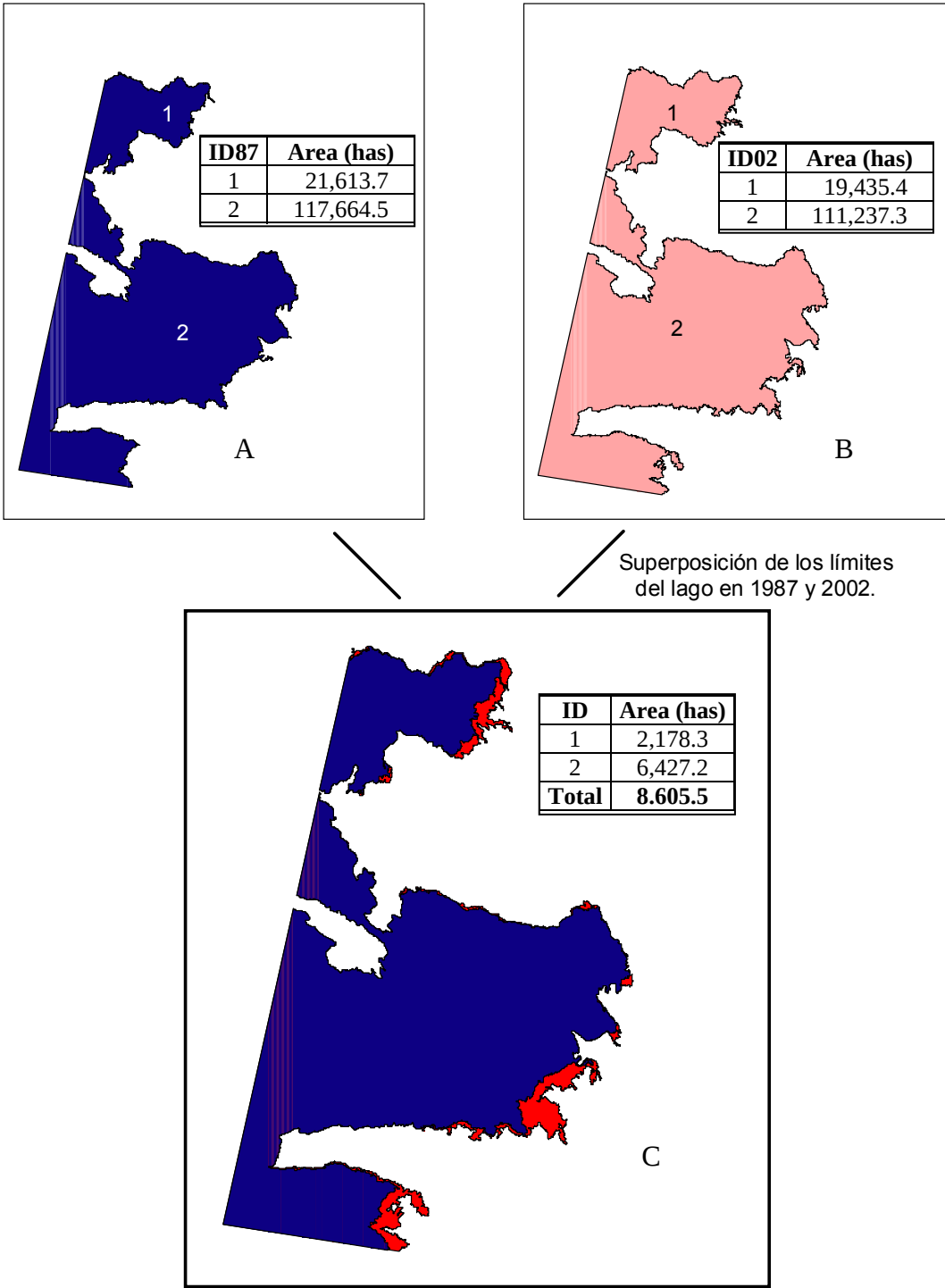


Figura 30. Limite visual del lago Titicaca en los periodos 1987 (A), 2002 (B) y sobreposición de ambos (C) donde el color rojo indica la superficie de retroceso del nivel de agua.

La figura 31 presenta un análisis más sistemático del cambio basado en la comparación de las imágenes clasificadas del lago para los periodos indicados, mostrando áreas donde no hubo cambio, y áreas donde el cambio fue muy significativo. El análisis de cambio se basa en el incremento, decremento o no cambio en el valor de la intensidad de cada píxel en las imágenes durante el periodo entre 1987 y 2002. Para este caso se consideraron siete niveles de cambio (tabla 14), que fueron agrupados en dos, no cambio significativo o importante (color blanco) y cambio significativo e importante (color rojo). El cambio más significativo correspondió a la regresión del lago dejando al descubierto aluviones. Esta regresión fue seguida por un decremento del nivel del agua en el lago y la recolonización de las áreas de agua poco profunda por totorales. El área de cambio significativo (suelos más totorales) correspondió a una superficie de 22,218 has (tabla 14).

Tabla 14. Niveles de cambio en la intensidad de brillo de los píxeles para el par de imágenes de 1987 y 2002.

Color	Intensidad	%	Area (has)	Agente causal	Cambio
Rojo	(+3)	1.3%	4,433.3	Iluminación o humedad	Cambios en la reflectancia del suelo y roca
Rojo	(+2)	6.0%	1,949.6	Iluminación o humedad	Cambios en la reflectancia del suelo y roca
Blanco	(+1)	84.6%	281,472.5	Iluminación	Efecto de fecha de toma de la imagen
Sin cambio	0	0%	0	-	-
Amarillo	(-1)	6.8%	22,700.1	Iluminación	Disminución del brillo debido a la presencia de sedimentos
Azul	(-2)	0.8%	2,686.8	Disminución de agua	Aparición de totorales
Azul	(-3)	5.9%	19,531.9	Disminución de agua	Efecto de la regresión lacustre (de agua a suelo)

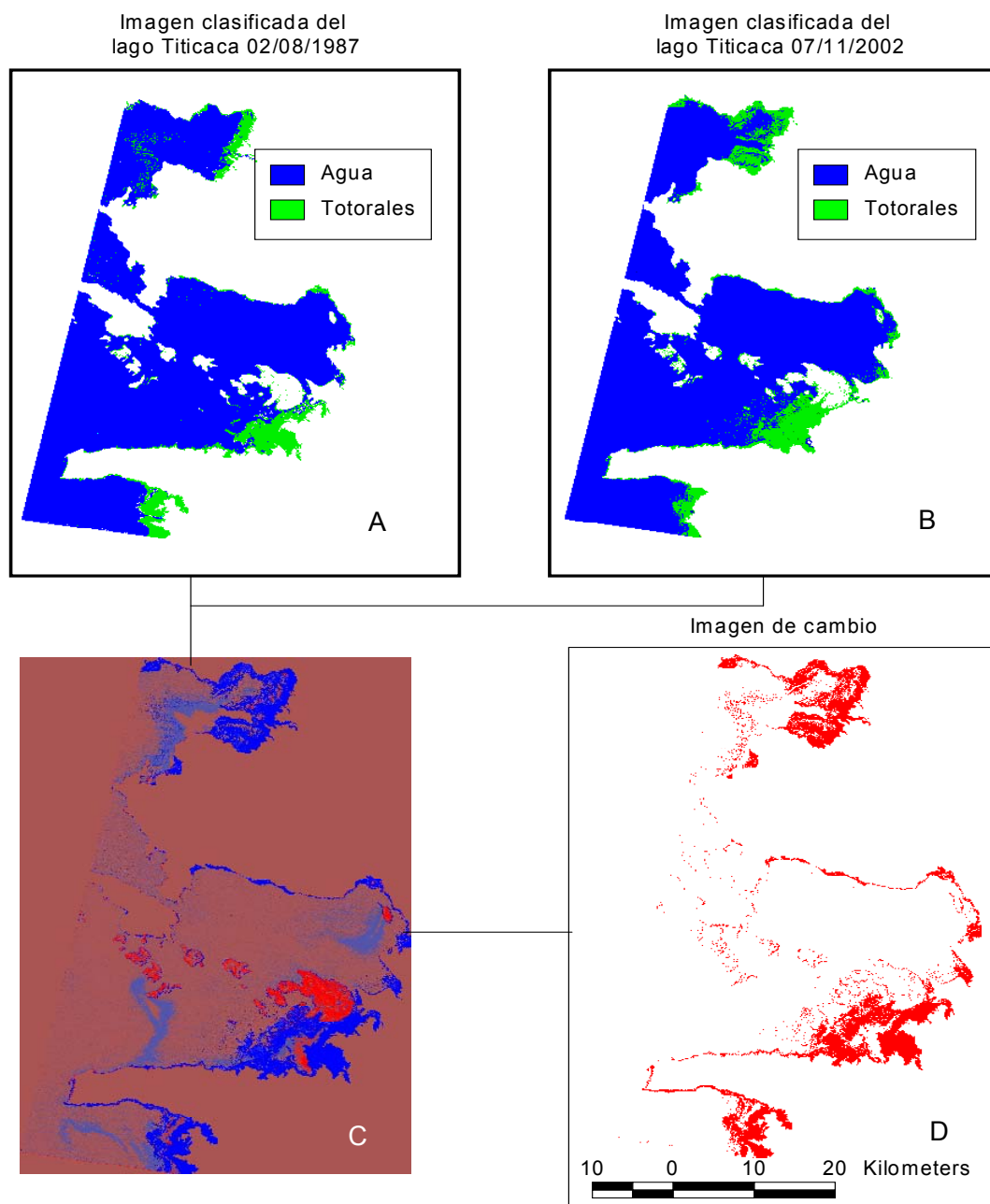


Figura 31. Imágenes clasificadas del lago Titicaca para los periodos 1987 (A), 2002 (B), imagen de cambio con siete (C) y dos niveles (D).

5.4.2 Cambios en la vegetación, suelo y uso de suelo

La figura 32 representa el cambio en la vegetación, suelo y uso del suelo ocurrido durante un periodo de quince años entre 1987 y 2002. La imagen 14C fue obtenida comparando píxel por píxel las imágenes clasificadas de 1987 (Fig. 32 A) y de 2002 (Fig. 32B).

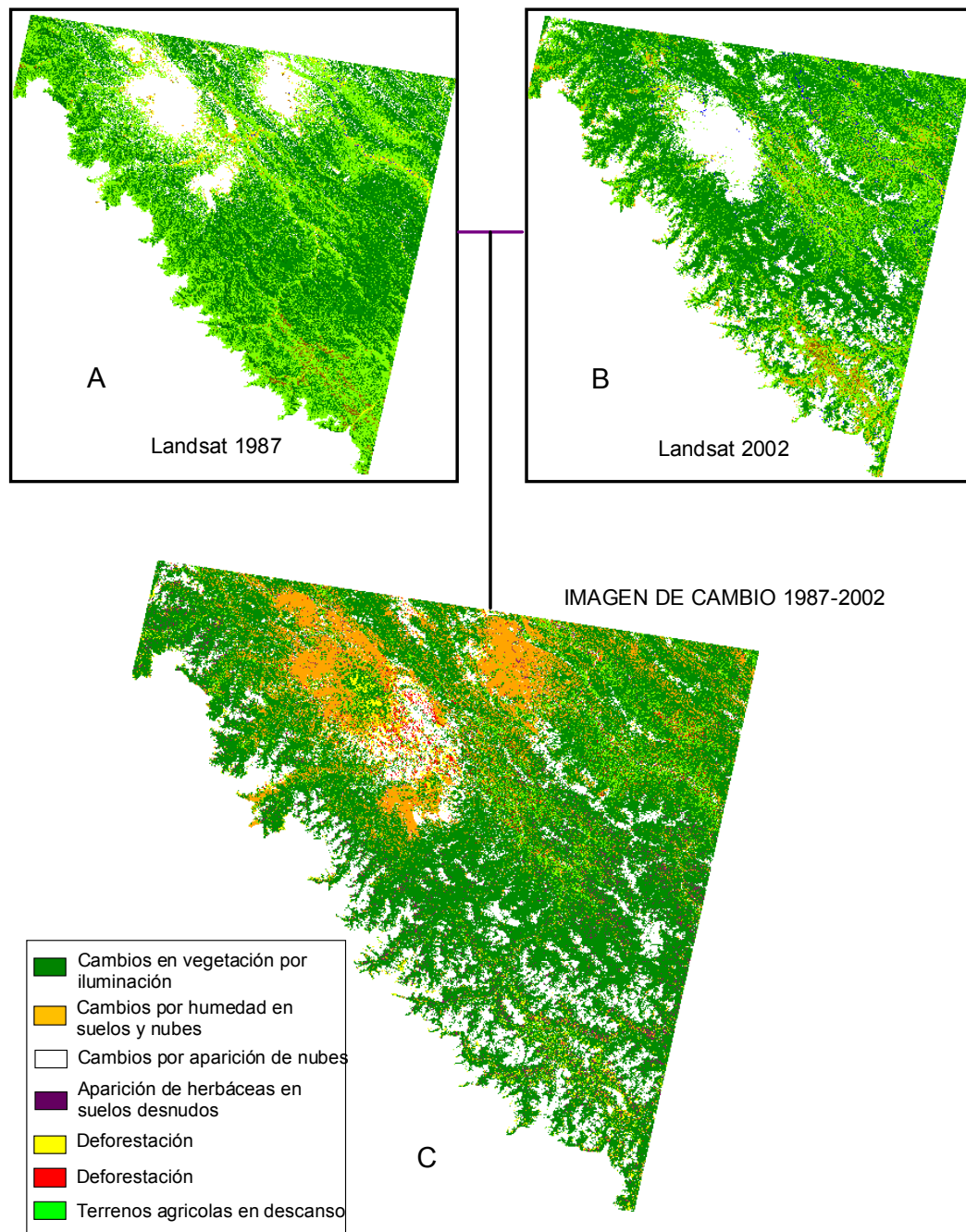


Figura 32. Imágenes clasificadas para el periodo 1987 (A), 2002 (B) e imagen de cambio (C)

La variación en la intensidad del brillo de cada píxel es causada por varios factores; efecto de la iluminación (color verde), presencia de nubes (color blanco), cambio en la vegetación, tal como densidad debido a la regeneración (color verde claro), deforestación (amarillo y rojo), crecimiento de pastizales en suelos desnudos y aluviones (color púrpura), y condiciones mixtas, tales como deforestación e incremento de humedad en suelos y nubes (color naranja). La tabla 15 indica que la superficie de los suelos desnudos ocasionados por la deforestación o uso agrícola de los suelos forestales fue de 612.2 km², también 862.3 km² de terrenos agrícolas fueron dejados en regeneración natural posiblemente debido al sistema agrícola de roza-tumba-quema.

Tabla 15. Análisis de cambio en vegetación, suelos y condiciones de humedad y nubosidad.

Color	Íncr./ decrem. en Intensidad	%	Área (Km ²)	Agente causal de cambio	Cambio ocurrido
Blanco	(+7):	15.6	2815.3	Nubes	Nubes donde antes era vegetación
Verde	(+6):	3.7	667.0	Periodos lluviosos	de Suelo desnudo a vegetación secundaria
Blanco	(+5):	0.4	67.1	Nubes	Nubes donde antes era sombra
Verde	(+4):	11.8	2133.1	Iluminación	Vegetación forestal
Verde	(+3):	9.1	1633.1	Iluminación	Vegetación forestal
Verde	(+2):	1.5	274.8	Iluminación	Vegetación forestal
Verde	(+1):	15.9	2857.7	Iluminación	Vegetación forestal
Negro		0.0	0.000		Sin cambios
Chatreuse	(-1):	4.8	862.3	Regeneración vegetal	Áreas agrícolas en descanso
Verde	(-2):	8.8	1586.0	Nubes e iluminación	Desaparición de nubes y menos brillo por efecto del horario de toma
Verde	(-3):	8.8	1578.1	Iluminación	Cambios en la iluminación
Amarillo	(-4):	2.5	448.9	Nubes y uso agrícola	Nubes que se mantuvieron en las dos imágenes y cambios de vegetación secundaria a suelo desnudo
Púrpura	(-5):	3.1	555.0	Crecimiento vegetal	Cambios de suelos desnudos y aluviones a vegetación secundaria por la estación lluviosa
Rojo	(-6):	1.1	189.3	Deforestación	Cambios de vegetación a suelos desnudos
Naranja	(-7):	12.9	2336.0	Deforestación y humedad	Cambios de vegetación a suelos desnudos, nubes y afloramientos rocosos
		4.3	769.8		Nubes
		6.3	1143.3		Afloramientos rocosos
		2.3	422.9		Cambios de vegetación a suelo desnudo

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten concluir que existe un cambio notorio en las características fisiográficas de los ecosistemas. El análisis de los mapas morfopedológicos de la región de estudio en 1987 y 2002 permiten concluir que hay una disminución notoria en la extensión del Lago Titicaca que representa 8,605.5 has de agua que actualmente corresponde a suelo desnudo. Esta superficie equivale en volumen de agua a 86 millones de metros cúbicos.

La tasa anual de deforestación de la selva tropical para el periodo entre 1987 a 2002 fue de 40.8 km² y la tasa anual de regeneración natural fue de 57.7 km² . Los Yungas por sus características fisiográficas juegan un papel primordial en la recarga de los acuíferos de la cuenca amazónica, como consecuencia de la explotación maderera y de cultivos de coca legales principalmente, la vegetación secundaria predomina sobre la primaria. La implementación de practicas de conservación es urgente para la recuperación y regeneración del bosque primario.

Las unidades morfopedológicas delineadas en este estudio, por sus características, deben constituirse en las unidades básicas de manejo integrado y sostenible de los recursos forestales, suelos y agua.

La baja resolución espectral de la imágenes ERTS-1 MSS y la falta de remuestreo espacial para la obtención de píxeles comparables a los del Landsat TM y ETM+ limitaron el uso de esta imagen en el análisis de cambio.

6.2 RECOMENDACIONES

La construcción de obras hidráulicas que regule el balance entre la cantidad de agua entrante y saliente del lago para contrarrestar el retroceso lacustre y la disminución del nivel de agua.

Se requiere de la implementación inmediata de una política ambiental que reduzca la deforestación y restablezca un plan de manejo integrado y conservación de los recursos suelo, agua y vegetación, basados en las características de las unidades morfopedológicas descritas.

Se recomienda ampliar los estudios morfopedológicos en todas las subcuencas del altiplano y amazonas, utilizando imágenes satelitales de alta resolución y a una mayor escala con información mas detallada para describir las unidades morfopedológicas.

BIBLIOGRAFIA.

- ALLEN, R. G., PEREIRA S., L., RAES D. Y SMITH M. 1998. Crop evapotranspiration (Guidelines for computing crop water requirements). FAO Irrigation and drainage paper N° 56. Food Agricultural Organization. Roma, Italia. 300 p.
- ALZERRECA A., H. PRIETO C., G., LAURA C., J., LUNA CH., D. Y LAGUNA B., S. 2001. Informe final características y distribución de los bofedales en el ámbito boliviano. Editores Autoridad Binacional Lago Titicaca- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo- Asociación Integral de Ganaderos en Camélidos en los Andes Altos. La Paz, Bolivia. 190p.
- BECKETT P.H.T. AND R. WEBSTER. 1965. Terrain classification and evaluation using air photography. A review of recent work at OXFORD Photogrametría, 26(1970). pp.51-75.
- BERTRAND, G. 1968. Paysage et géographie physique globales. Esquisse méthodologique. Revue Géographique des Pyrénées et du Sud Ouest. T. XXXIX. Toulouse, Francia. sp.
- BRINCK, A. B., J.A. MARBUTT, R. WEBSTER AND P.H.T. BECKETT. 1966. Military Eng. Exp. Estall, Christchurch, England. 1965.
- CAMPBELL B., J. 1996. Introduction to remote sensing. Second edition. Ed. Guildford Press.
- CARE. BOLIVIA. 2003. Mapa geológico. Parque nacional y área natural de manejo integrado Madidi. Apoyo a la administración del PN y ANMI

Madidi. Elaborado por Centro de Análisis Espacial (CAE) Instituto de Ecología. La Paz, Bolivia.

CEDEFOA. 2001. Centro de Desarrollo y Fomento a la Autoayuda. Estudio Socioeconómico. Volumen I. *In*. Proyecto de la conservación de la biodiversidad en el sistema TDPS. Subcontrato Reserva Desaguadero – Mauri. Gerencia Nacional Bolivia. Editores Autoridad Binacional Autónoma del Sistema Hídrico Lago Titicaca – Río Desaguadero - Lago Poopo – Salar de Coipasa y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. La Paz, Bolivia. 343p.

CEDEFOA. 2001. Centro de Desarrollo y Fomento a la Autoayuda. Mapas del área de estudio. Volumen V. *In*. Proyecto de la conservación de la biodiversidad en el sistema TDPS. Subcontrato Reserva Desaguadero – Mauri. Gerencia Nacional Bolivia. Editores Autoridad Binacional Autónoma del Sistema Hídrico Lago Titicaca – Río Desaguadero - Lago Poopo – Salar de Coipasa y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. La Paz, Bolivia. 343p.

CHANDER G. AND B. MARKHAM 2003. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Post-Calibration Dynamic Ranges. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on. 41(11):2674-2677.

CHARRIE, R y N. MUÑOZ. 1993. Geología y tectónica del Altiplano Chileno. Biblioteca digital de la Universidad de Chile. Documento disponible a través de Internet: http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias_veterinarias_y_pecuarias/simposio1993/01areacienciasdelatierra/10.html. Revisado 01/07/2004.

- CHAVEZ, P.S., Jr., 1996. Image-based atmospheric corrections - revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, (62)9:1025-1036.
- CHO S. 2000. Digital Change Detection by Post-classification Comparison of Multitemporal Remotely-Sensed Data. *Journal of the Korean Society of Remote Sensing*. (16)4:367-373.
- CHRISTIAN, C.S.AND G. A. STEWART. 1968. Methodology of integrated surveys *In* Aerial surveys and integrated studies. Proc. Toulouse Cnf. 1964. UNESCO, Paris, France. pp 223-80.
- COPPIN P., I. JONCKHEERE, K. NACKAERTS, B. MUYS. 2004. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *Int. J. Remote Sensing*. Taylor & Francis. 25(9):1565-1596.
- CUMAT. 1992. Centro de investigaciones de la capacidad de uso mayor de la tierra. Desbosque de la Amazonía Boliviana. La Paz, Bolivia.
- DOORENBOS, J. AND PRUITT, W.O. 1975. Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 24. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 179 p.
- DOUGLAS S., W. 1982. Terrain analysis: A guide to site selection using aerial photographic interpretation. (Community Development Series). Second edition. Editado por Dowden, Hutchinson and Ross Inc. Struodsborg, Pennsylvania, USA. 392p.
- ENVIRONMENTAL SYSTEM RESEARCH INSTITUTE INC.1985. ARCINFO. Redlands, California, USA.
- ENVIRONMENTAL SYSTEM RESEARCH INSTITUTE INC.1999. ARCVIEW Version 3.2. Redlands, California, USA.

EUROCONSULT, 1999. Programa para el Ordenamiento Territorial de la Región Amazónica Boliviana en los Departamentos de La Paz, Beni y Cochabamba. Zonificación Agro-ecológica y Propuesta Técnica del Plan de Uso del Suelo de la Región Amazónica del Departamento de La Paz. Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación. Viceministerio de Planificación y Ordenamiento Territorial. Bolivia. 172 p.

ERDAS. 1997. ERDAS Field Guide. Fourth edition revised and expanded. ERDAS Inc. Atlanta Georgia. USA. 660 p.

FAO. 1996. Food Agricultural Organization of United Nations. Forest Resources Assessment 1990: survey of tropical forest cover and study of change processes. FAO Forestry Paper 130,

FRÈRE, M., J. REA Y J. Q. RIJKS. 1975. Estudio agro climatológico de la zona andina (Informe Técnico). Parte I. FAO-UNESCO-OMM. Roma, Italia. 175p.

HÉRAIL G., P. ROCHAT, P. BABY, O. ARANIBAR, A. LAVENU Y G. MASCLEZ 1993. El altiplano norte de Bolivia: Evolución geológica terciaria. Biblioteca digital de la Universidad de Chile. Documento disponible a través de Internet: http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias_veterinarias_y_pecuarias/simposio1993/01areacienciasdelatierra/11.html. Revisado 01/07/2004.

IMG. 2000. Instituto Geográfico Militar. Bolivia. Cartas topográficas en formato digital del departamento de La Paz. Escala 1:250, 000.

INE. 2002. Instituto Nacional de Estadística. Bolivia. Mapas estadísticos del departamento de La Paz. Censo 2002. La Paz, Bolivia.

- JARAMILLO, C. Y T. KELLY 2004 La deforestación y los derechos de propiedad en América Latina. Interamerican Development Bank. Disponible a través de Internet. <http://www.iadb.org/sds/doc/ENV-JaramilloKelly-S.pdf>. Revisado 11/10/2004.
- JENSEN, J. R. 1996. Introductory digital image processing a remote sensing perspective. Second Edition. Prentice Hall. New Jersey. United States. 318p.
- LIU H. Y ZHOU Q. 2004. Accuracy analysis of remote sensing change detection by rule-based rationality evaluation with post-classification comparison. Int. J. Remote Sensing. Taylor & Francis. 25(5):1037-1050.
- LOPEZ V., M. L. 1978. Manual de foto geología. Publicaciones científicas de la Junta de Energía Nuclear. Madrid, España. 286p.
- MAS J.-F. 1999. Monitoring land-cover changes a comparison of change detection techniques. Int. J. Remote Sensing. Taylor & Francis. 20(1):139-152.
- MONTES DE OCA, I. 1995. Geografía y clima de Bolivia. *In* Eaux, glaciers et changements climatiques dans les andes tropicales. Bulletin de l'IFEA. Editado por Institut français d'études andines. Tomo 24. 3:357-368. Lima, Perú.
- MOUAT, D. A., G. M. GLENDON, J. LANCASTER. 1993. Remote sensing techniques in the analysis of change detection. Geocarto International. Hong Kong, China. 8(2):39-50.
- NASA. 2003. National Aeronautics Space Administration. LANDSAT 7. Science Data User Handbook. Documento disponible a través de Internet. <http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook.htmls/chapter1/chapter1.html>. Revisado 23/04/2004.

- NAVARRO, G Y M. MALDONADO. 2002. Geografía ecológica de Bolivia. Vegetación y Ambientes acuáticos. Fundación Simón I. Patiño. Cochabamba, Bolivia. 719 p.
- OEA. 2003. Organización de los Estados Americanos. Programa de Acción Integrado Peruano Boliviano -PAIPB - Diagnostico Regional Integrado. Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto Bolivia y Ministerio de la presidencia Perú. Disponible a través de Internet: <http://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea81s/begin.htm>
- ORTIZ-SOLORIO, C. A. y H. E, CUANALO DE LA C. 1978. Metodología del levantamiento fisiográfico. Un sistema de clasificación de tierras. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 85p.
- PERZ G., S., E. C. ARAMBURÚ, J. BREMNER. 2003. Cambios poblacionales y uso del suelo en la cuenca amazónica. *In* Amazonía procesos demográficos y ambientales. Ed. Carlos E. Amburú y Eduardo Bedoya Garland. Consorcio de Investigación Económica y Social (CIES). Lima, Perú. 182p.
- PIKE, R.J. 1988. The geometric signature: Quantifying landslide terrain types from digital elevation models, Mathematical Geology, 20 (5), pp.491-511.
- RSI. 2003. Research Systems Inc. User's guide ENVI versión 4.0. Boulder, Colorado, USA. 1084 p.
- RSI. 2003. Research Systems, Inc. ENVI. The Environment for Visualizing Images Version 4.1. Boulder, Colorado, USA.
- SERNAP. 2004. Servicio Nacional de Áreas Protegidas. Bolivia. Madidi de Bolivia, mágico, único y nuestro. Disponible a través de Internet. <http://www.sernap.gov.bo/madidi>

- SINGH A. 1989. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *Int. J. Remote Sensing*. Taylor & Francis. (10)6:989-1003.
- SMITH N., D. AND J. T. KILLEEN 1995. A comparison of the structure and composition of montane and lowland tropical forest in the Serranía Pilon Lajas, Beni, Bolivia. Missouri Botanical Garden. St Louis, Missouri, USA 18p. Disponible a través de Internet: <http://www.mobot.org/MOBOT/research/bolivia/pilonarticle/article.pdf>
- THORNTON, C. W. AND J. R. MATHER 1955. The Water Balance. Drexel Institute of Technology. Laboratory of Climatology. USA. s/p.
- TRICART J y J. KILLIAN. 1982. La ecogeografía y la ordenación del medio natural. Ed. Anagrama. Barcelona, España. 240-253 pp.
- TUCKER, C. J. and J. R. G TOWNSHEND. 2000. Strategies for monitoring tropical deforestation using satellite data. *Int. J. Remote Sensing*. Taylor & Francis 21(6):1461-1471.
- WILSON, J. P. AND J. C. GALLANT 2000. Digital terrain analysis: Principles and applications. Ed. John Wiley & Sons Inc. New York. NY. USA. 1-28pp.
- WOOD, J. 2004. The geomorphological characterization of digital elevation models. Ph D. Thesis. Department of Information Science. City University. Northampton, Square, London. Disponible a través de Internet. <http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd/>. Revisado 25/03/2004.
- ZONISIG. 1998. Zonificación agro-ecológica y socioeconómica de la cuenca del altiplano del departamento de La Paz. Ministerio de desarrollo sostenible y Planificación de Bolivia. La Paz, Bolivia. 211p.