



Conservación del Bosque en Costa Rica

Academia Nacional de Ciencias
Programa Centroamericano de Población



PRESENTACION

Conservación del bosque en Costa Rica, es la obra que recoge el aporte de 22 prestigiosos expertos, quienes bajo los auspicios de la Academia Nacional de Ciencias de Costa Rica, del Programa Centroamericano de Población (PCP) de la Universidad de Costa Rica y con el apoyo de la Fundación Rockefeller, se reunieron en octubre de 1997, para valorar el estado del bosque en Costa Rica, proponer ideas, evaluar alternativas y ofrecer recomendaciones tendientes a mejorar el uso, manejo y conservación del remanente boscoso actual.

Los bosques de ayer y de hoy no pueden ser reproducidos para el mañana. Los procesos naturales que han dado origen a las especies, comunidades y ecosistemas actuales que deseamos preservar, han sido constituidos a través de una larga escala de tiempo y amplios espacios; en consecuencia, el esfuerzo por conservarlos está sujeto al conocimiento de la biología del bosque y a los límites impuestos por la evolución para generar nuevas combinaciones genéticas capaces de sobrevivir en el ambiente cambiante de un sitio particular. Los bosques remanentes son entidades complejas y únicas; no son replicables ni sustituibles, pero sí utilizables en forma racional.

Es evidente que el aumento de la población ha ejercido un fuerte impacto sobre la deforestación y la presión demográfica continuará acentuándola y alcanzará incluso a las áreas protegidas. Es incorrecto y engañoso afirmar que el país alcanzó un grado de "cero deforestación", porque las plantaciones forestales no compensan la pérdida del bosque natural. Las plantaciones se inician cuando el bosque deja de ser un recurso infinito y la siembra de árboles ingresa a la categoría de cultivo. Las plantaciones son usualmente monoespecíficas y la mayoría de las especies utilizadas son introducidas. Representan una alternativa para revegetar, para agregar valor a un terreno abandonado; no obstante, los beneficios ambientales que ofrecen no son equiparables a los del bosque natural.

Es también fundamental distinguir entre deforestación y aprovechamiento racional del bosque, dicen los expertos. La deforestación y las operaciones de tala sin planes de manejo diseñados con conocimiento, amenazan la diversidad genética de los bosques. Inducen cambios en la distribución y abundancia de las especies, provocan el aislamiento de los individuos, eliminan poblaciones locales, extinguen especies; por otra parte, erosionan los suelos, alteran los regímenes hídricos y el microclima. El manejo del bosque reduce notablemente el impacto negativo y constituye un instrumento importante para su conservación. El bosque



tropical puede ser manejado para múltiples usos -que incluyen la producción de madera y otros productos secundarios- y continuar siendo un hábitat adecuado. Desde luego, el manejo del bosque natural para explotación sostenida, demanda conocimiento de los procesos de regeneración natural. En Costa Rica existen ya bosques naturales que se cosechan bajo prácticas de manejo destinadas a producir alteraciones menores. Los bosques de caobilla (*Carapa guianensis*), que administra Portico, S.A. en la Zona Norte del país y los bosques en el Área de Conservación de la Cordillera Volcánica Central (ACCVC) que mantiene FUNDECOR bajo un sofisticado plan de manejo, son ejemplos patentes del esfuerzo que se realiza en ese sentido.

El conocimiento y las técnicas disponibles en la actualidad deben utilizarse para lograr un balance entre producción y conservación. La expansión de la población paralela al incremento en el consumo de bienes derivados del bosque impone límites a la conservación de éste. Esta va unida a la valoración de los servicios ambientales que el bosque presta en términos de biodiversidad, protección del suelo, mantenimiento de los regímenes hídricos y el microclima, fijación de bióxido de carbono y paisaje. Insustituible es el bosque en la prestación de todos y cada uno de ellos; sin embargo, la función que desempeña el agua en el desarrollo socioeconómico actual y futuro, merece que se le confiera un valor especial. Así como existen reservas biológicas, deberían crearse reservas hidrológicas, opinaron los expertos.

La venta de servicios ambientales constituye hoy una estrategia nacional y Costa Rica ha asumido el liderazgo en el nivel internacional. Este mecanismo permite que finalmente se retribuya al propietario del bosque el esfuerzo que realiza para que la sociedad continúe recibiendo los beneficios que aquél proporciona. La conservación del bosque es, en última instancia, un problema socioeconómico; éste debe ser valorado en su justa dimensión y resuelto con políticas forestales integrales que tomen en consideración los múltiples actores y la variedad de intereses involucrados.

Notable es el conocimiento de los expertos en esta área del saber y tangibles son los logros obtenidos por el país; sin embargo, muy largo es aún el camino por recorrer. Con la entrega de esta obra a la comunidad costarricense y a las autoridades del sector, la Academia Nacional de Ciencias contribuye a trazar el norte del camino por emprender.

Eugenia M. Flores, Ph. D.
Presidenta
Academia Nacional de Ciencias



RECONOCIMIENTOS

Esta publicación recoge las contribuciones presentadas a la “Reunión de Expertos en Conservación del Bosque en Costa Rica”, celebrada en Hotel el Tiro, San Rafael de Heredia, el 30 y 31 de octubre de 1997. Los expertos aportaron de manera desinteresada su tiempo, esfuerzo y conocimientos en la preparación de los manuscritos y en las discusiones de la reunión. La **Academia Nacional de Ciencias de Costa Rica** y el **Programa Centroamericano de Población (PCP)** de la Universidad de Costa Rica (proyecto VAS-ED-083-97), auspiciaron conjuntamente la reunión de expertos y la presente publicación. La **Fundación Rockefeller**, apoyó estas actividades con una subvención de la división de Ciencias de la Población (“Grant” PS 9617). La organización de la reunión y la edición del libro estuvieron a cargo de Luis Rosero Bixby, Ph.D., miembro de la Academia Nacional de Ciencias y Catedrático de la Universidad de Costa Rica, en colaboración con el Máster Edwin Chaves Esquivel, investigador del Programa Centroamericano de Población.



AUTORES

Dr. Juan Antonio Aguirre

Centro Agronómico Tropical de Investigación y
Enseñanza Turrialba, Costa Rica
Tel.: 556-1016, Fax: 556-0914
E-mail: jaguirre@catie.ac.cr

Dr. Alfredo Alvarado

Centro de Investigaciones Agronómicas
Universidad de Costa Rica
Tel.: 207-5490, Fax: 234-1627
E-mail: alfredoal@cariari.ucr.ac.cr

Ing. Alvaro Bolaños

Instituto Costarricense de Electricidad
Oficina de Bienes Inmuebles y
Recursos Forestales
Apartado 10032 San José, Costa Rica
Tel.: 220-7599 o 220-6434, Fax: 220-6433.

Dr. Julio Cesar Calvo

Centro Científico Tropical
Tel.: 253-3267, Fax: 253-4963
E-mail: jcalvo@cct.or.cr

Lic. Max Campos

Comite Regional de Recursos Hidráulicos
Proyecto Centroamericano sobre
Cambio Climático
Tel.: 231-5791, Fax: 296-0047
E-mail: crrhcr@sol.racsa.co.cr

Dr. Rafael Celis

ProDesarrollo Internacional
Apartado 253- 2250
Tres Rios, Costa Rica
Tel.: 283-7770 o 283-0014, Fax: 283-8837
E-mail: leadcr@sol.racsa.co.cr

Dr. Ronnie De Camino

Universidad para la Paz
Tel.: 282-9340, Fax: 282-6257
E-mail: pwrdecam@sol.racsa.co
E-mail: recnatro@sol.racsa.co.cr

M.Sc. Carlos Elizondo

Instituto Geográfico Nacional
Tel.: 257-7418 ext.2620
E-mail: igncr@ns.casapres.go.cr

Dr. Luis Fournier

Escuela de Biología Universidad de Costa Rica
Tel.: 225-4757, Fax: 207- 4216

Eileen H. Helmer

Department of Forest Science Oregon
State University
154 Peavy, Covallis, Oregon 97331EEUU
E-mail: helmere@ccmail.orst.edu

M.Sc. Bernal Herrera

Centro de Investigaciones Agronómicas
Universidad de Costa Rica
Tel.: 207-5490, Fax: 234-1627
E-mail: bernalh@cariari.ucr.ac.cr



Dr. Anthony Janetos

Mission to Planet Earth NASA 300 EST, SW
Washington, D.C. 20546 EEUU
Tel.: (202)358-0276, Fax: (202)358-2771
E-mail: anthony.janetos@hq.nasa.gov

M.Sc. Tirso Maldonado

Fundación Neotrópica
Tel.: 253-2130, Fax: 253-4210
E-mail: fneotrop@sol.racsa.co.cr

Dr. Edgar Ortíz Malavasi

Departamento Forestal Instituto Tecnológico de
Costa Rica Biometría Forestal y Sistemas de
Información Geográfica
Apartado 159-7050 Cartago, Costa Rica
Tel.: 237-7039 ext. 2279 o 2313,
Fax: 591-4182

Dr. Alberto Palloni

Center for Demography and Ecology
University of Wisconsin
4426 Social Science Bldg 1180 Observatory
Drive Madison, WI 53706 EEUU
E-mail: palloni@ssc.wisc.edu

Dr. Lucio Pedroni

Centro Agronómico Tropical de Investigación y
Enseñanza Turrialba, Costa Rica
Tel.: 556-1530, Fax: 556-1533
E-mail: lpredroni@catie.ac.cr

M.Sc. Walter Picado

Recursos Naturales Tropicales

Apartado 991-1007 San José, Costa Rica
Tel.: 221-8652 o 445-6713,
Fax: 221 7368 o 445-6713
E-mail: recnatro@sol.racsa.co.cr

Dr. Carlos Pomareda

SIDE
Tel.: 225-9423, Fax: 234-6838
E-mail: sidesa@sol.racsa.co.cr

Dr. Luis Rosero Bixby

Programa Centroamericano de Población
Escuela de Estadística Universidad
de Costa Rica
Tel.: 207-5693, 283-7017, Fax: 207-5692
E-mail: lrosero@cariari.ucr.ac.cr

Dr. Rodolfo Salazar

Centro Agronómico Tropical de Investigación y
Enseñanza Turrialba, Costa Rica
Tel.: 556-1933, Fax: 556-7766
E-mail: rsalazar@catie.ac.cr

Dr. Sergio Velásquez

Centro Agronómico Tropical de Investigación y
Enseñanza Turrialba, Costa Rica
Tel.: 556-1530, Fax: 556-1533
E-mail: svelasqu@catie.ac.cr

M.Sc. Vicente Watson

Centro Científico Tropical
Tel.: 253-3267, Fax: 253-4963
E-mail: vwatson@cct.or.cr



INDICE

CONSERVACION DEL BOSQUE

Presentación

EUGENIA FLORES

Capítulo 1:

Vocación forestal del suelo en áreas tropicales

Clasificación de tierras para uso forestal y la estimación de su capacidad productiva 9

ALFREDO ALVARADO Y BERNAL HERRERA

Uso de la tierra y fragmentación de bosques: algunas áreas críticas en el área de conservación Osa, Costa Rica 28

TIRSO MALDONADO

Recuperación de tierras degradadas en el lado pacífico de la Serranía de Tilarán 50

VICENTE WATSON

Capítulo 2:

Medición y diagnóstico de cobertura boscosa

Cambios en uso y cubierta de tierras: una prioridad de la Misión al Planeta Tierra de la NASA 59

ANTHONY C. JANETOS

Desarrollo del proyecto Globesar en Costa Rica 76

CARLOS ELIZONDO Y LUIS. B. ZAMORA

Medición y diagnóstico de cobertura boscosa: ¿Qué tan útiles son las imágenes de satélite en nuestro medio? 85

SERGIO VELÁSQUEZ Y LUCIO PEDRONI



Índice

Estimación de biomasa arriba del suelo en árboles de un bosque humedo tropical 100
EDGAR ORTÍZ MALAVASI

Identificación del uso de la tierra y etapas sucesivas de los bosques en las reservas forestales de Río Los Santos y Río Macho 109
EILEEN H. HELMER

Fragmentos de bosque y corredores biológicos 117
LUIS FOURNIER

Capítulo 3:

Factores determinantes de la deforestación/reforestación

Población y deforestación en Costa Rica 131
LUIS ROSERO BIXBY Y ALBERTO PALLONI

La relación entre el desarrollo económico y la destrucción y conservación del bosque en Costa Rica 151
RAFAEL CELIS

La actividad forestal en el desarrollo de los proyectos hidroeléctricos del ICE 161
ALVARO BOLAÑOS

Capítulo 4:

Consecuencias de la pérdida o conservación del bosque

El clima, su variedad y cambio y la deforestación en Costa Rica 169
MAX CAMPOS

Impacto económico de la pérdida y conservación del bosque 182
RODOLFO SALAZAR

Impacto de la reforestación 187
JULIO CESAR CALVO



Capítulo 5:

Manejo socioeconómico del bosque

¿Son las plantaciones forestales un negocio rentable? 195

RONNIE DEL CAMINO

Consideraciones sobre las políticas para el desarrollo forestal en

Costa Rica 220

CARLOS POMAREDA

Generación de ingresos a través de la valoración total de los bienes y servicios del bosque tropical 242

JUAN ANTONIO AGUIRRE

Consideraciones sobre el manejo sostenible del bosque sucesional en Costa Rica 256

WALTER PICADO

Conclusión

LUIS ROSERO BIXBY 275



MEDICION Y DIAGNOSTICO DE COBERTURA BOSCOsa: ¿QUE TAN UTILES SON LAS IMAGENES DE SATELITE EN NUESTRO MEDIO?

Lucio Pedroni, Sergio Velásquez¹

INTRODUCCION

En Costa Rica la teledetección inició en el decenio de 1940 , cuando por primera vez se tomaron e interpretaron fotografías aéreas del territorio nacional (Leclerc, Beaulieu y Charles Hall, en preparación). Con el pasar de los años han llegado al mercado nuevos tipos de sensores remotos y, a las plataformas transportadas por aviones (cámaras ópticas, sistemas tipo scanner, radar y láser) se han sumado aquellas montadas en satélites (AVHRR, Landsat MSS, Landsat TM, SPOT, RADARSAT, etc.). Muchos de estos sensores han sido utilizados en investigaciones realizadas en Costa Rica, así que hoy contamos con más de 25 estudios para áreas superiores a 5000 km² (Leclerc *et al.*, en preparación) y un número sin duda mayor para áreas de tamaño menor. ¿Cuáles enseñanzas nos dan estas experiencias y las de países con condiciones similares a las de Costa Rica? ¿Qué tan útil y confiable es el análisis de imágenes de satélite para medir y diagnosticar la cobertura boscosa de Costa Rica? Y, sobre todo, ¿Qué podemos esperar de esta tecnología en el futuro?

En este artículo discutiremos estos aspectos refiriéndonos sobre todo a las imágenes de los sensores Landsat. De todas los datos de satélite disponibles en el mercado, las imágenes de los satélites Landsat son las que con más frecuencia han sido analizadas en Costa Rica (Leclerc *et al.*, en preparación). Es probable que esta tendencia siga por un tiempo, a pesar de que nuevos sensores, con mejor resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal (incluidas nuevas generaciones de sensores Landsat) entrarán en el mercado en los años venideros. El costo por unidad de área de las imágenes Landsat es comparativamente más bajo que el costo de las imágenes producidas por otros tipos de sensores, y esto es un factor determinante en Costa Rica donde es notorio que los recursos financieros no son abundantes.

¹ Centro Agronómico Tropical de Investigación



EL PROGRAMA LANDSAT

Los satélites Landsat pertenecen a un programa de la NASA diseñado para monitorear de manera sistemática y consistente los recursos terrestres. El primer satélite Landsat fue lanzado en julio de 1972 y el último (Landsat 6) en octubre de 1993. Sin embargo, no se logró poner en órbita Landsat 6, por lo que el sensor que actualmente sigue funcionando, más allá de su vida útil, es el de Landsat 5, puesto en órbita en octubre de 1984 (Jensen 1996). Los sensores remotos transportados por los satélites Landsat son pasivos y de tipo scanner multi-espectral. Recogen datos recorriendo una órbita polar y heliosíncrona a lo ancho de una franja de 185 km, con una frecuencia de 18 días (Landsat 1-3) y 16 días (Landsat 4-5) respectivamente. La primera generación de satélites Landsat llevaba un sensor llamado Multispectral Scanner (MSS, Landsat 1-3, julio de 1972 - julio 1982), que tenía una resolución espacial de 79 x 79 m y tomaba datos en dos bandas visibles y dos del infrarrojo reflectivo. Con el Landsat 4 (julio de 1982) se puso en órbita un nuevo sensor, el Thematic Mapper (TM), que tiene una mejor resolución espacial (28.5 x 28.5 m) y recoge datos en tres bandas visibles, tres del infrarrojo reflectivo y una del infrarrojo térmico. Próximamente se lanzará Landsat 7, que tendrá características similares a Landsat 5, con la adición de un canal pancromático (con resolución espacial de 15 x 15 m) y también con mejoras en la resolución espacial del canal térmico y en la calibración del sensor.

La serie Landsat produjo 25 años de medición sistemática y consistente de la superficie del planeta, lo que nos ofrece la posibilidad de estudiar los cambios de cobertura del suelo que han ocurrido en un cuarto de siglo.

Actualmente, la mayoría de las imágenes de Landsat para la región centroamericana y, en particular Costa Rica son distribuidas por tres instituciones: CLIRSEN (Ecuador), EROS Data Center (USGS, Estados Unidos (USA) y EOSAT (USA). Los precios varían según el tipo de producto (impreso o digital), el grado de preproceso de la imagen (orientada al paso u orientada al mapa), y la actualidad de las imágenes (imágenes de 10 o más años son significativamente más baratas).



VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO Y ANALISIS DE IMAGENES DIGITALES

El análisis de imágenes digitales, como las producidas por los sensores Landsat MSS y Landsat TM, tiene las siguientes ventajas sobre la interpretación de fotografías aéreas:

- Mejor resolución radiométrica: se pueden distinguir claramente varios tonos de "gris" en cada banda (256 con Landsat TM), cuando el ojo humano con dificultad diferencia una decena de tonos de manera consistente.
- Rango y resolución espectral: Se pueden analizar simultáneamente varias porciones del espectro electromagnético (7 "bandas" con Landsat TM y 4 con Landsat MSS).
- Hay más consistencia y replicabilidad en el proceso de análisis digital de la imagen (con computadora) que en el proceso visual de foto-interpretación.
- Potencial de combinar los datos de la imagen con datos de sistemas de información geográfica (SIG).
- Menor costo por superficie analizada.

Sin embargo también existen desventajas, entre ellas:

- El análisis computarizado de las imágenes solamente usa el tono del color y a veces la textura y el sitio, pero generalmente no usa el tamaño, la forma, los patrones, la sombra, y la asociación como criterios de interpretación.
- La resolución espacial ("área mínima visible") es generalmente inferior a la de los sistemas fotográficos (79 x 79 m con Landsat MSS y 28.5 x 28.5 con Landsat TM). Esto podría cambiar con las nuevas generaciones de sensores remotos (4 x 4 m y hasta menos).
- Falta de conocimiento sobre la relación entre la energía medida por el sensor y la energía reflejada y emitida por los objetos al suelo.
- Cobertura frecuente de nubes, especialmente en los trópicos húmedos. Esta es quizás la limitante más importante que tenemos con sensores ópticos en Costa Rica.



Es importante que por cada aplicación se evalúen cuidadosamente las ventajas y desventajas respectivas del uso de imágenes de satélite versus otras alternativas, tales como la interpretación de fotografías aéreas. No es cierto que el análisis de imágenes, por utilizar una tecnología más sofisticada, produce siempre los resultados más confiables, como no es cierto que el análisis computarizado de las imágenes es siempre mejor de la interpretación visual de las imágenes.

PRINCIPALES LIMITANTES BIOFISICAS EN EL ANALISIS DE IMAGENES DE SATELITE EN COSTA RICA

Con una imagen Landsat completa podemos “ver” y analizar simultáneamente un área de aproximadamente $185 \times 178 \text{ km} = 32.930 \text{ km}^2$. Para cubrir la misma área con fotografías aéreas a una escala de 1:60,000 deberíamos interpretar aproximadamente 300 fotografías, o 1500 fotografías si la escala de las mismas fuera de 1:30,000. De allí la ventaja de trabajar con imágenes de satélite. Sin embargo, las características intrínsecas de las imágenes digitales de los sensores ópticos y las características particulares del clima, de la topografía, de la vegetación y del uso de la tierra en Costa Rica, hacen que en el país el análisis de las imágenes de satélite sea más difícil de concluir con niveles bajos de error (confusión) que en otras partes del mundo. Veamos:

- **El fraccionamiento del territorio:** En Costa Rica las propiedades son muy fraccionadas y por lo tanto el uso y la cobertura del suelo tienden a presentarse de manera muy fragmentada. Eso es particularmente importante en el caso de los bosques, donde se ha demostrado que los fragmentos de bosques de tamaño pequeño son más numerosos y cubren una área total más grande que los pocos fragmentos de gran tamaño que quedan en el país (Sanchez-Azofeifa, 1996). Mapear correctamente áreas pequeñas de bosque es muy importante, puesto que dichos fragmentos tienen una función importante en el paisaje por ser corredores biológicos (Fournier, 1997), reservas de semillas forestales y lugares donde la fauna deposita semillas procedentes de otros lugares. Sin embargo, un territorio muy fragmentado es difícil de clasificar digitalmente por las siguientes razones: primero, los bordes de los fragmentos en la



imagen digital se representan como “pixeles mixtos”, los cuales tienen características espectrales distintas a los pixeles que se encuentran dentro del fragmento y fuera del fragmento. Estos pixeles muchas veces no son clasificados correctamente por los algoritmos más comunes de análisis digital. Segundo, un territorio muy fragmentado presenta pocas áreas homogéneas de tamaño suficientemente grande para tomar las “firmas espectrales” de las categorías que se necesita mapear.

- **Las nubes:** Costa Rica es uno de los países más lluviosos del mundo. Además, está caracterizado por regímenes de lluvia claramente distintos en las dos vertientes atlántica y pacífica. La frecuencia de 16 días de las mediciones del Landsat, combinada con la muy baja frecuencia de cielos completamente despejados hacen que la probabilidad de obtener escenas sin o con muy pocas nubes es muy baja en Costa Rica. Los intervalos entre dos escenas aceptablemente limpias de nubes pueden ser de varios años.
- **Las brumas:** En Costa Rica, son frecuentes las brumas matutinas. Estas brumas crean una diferencia entre la señal emitida por los objetos al suelo y la señal medida por el sensor, especialmente en la bandas visibles del espectro electromagnético. Estas brumas no son necesariamente visibles en la imagen, y con la variabilidad climática que tenemos en Costa Rica, tampoco son uniformes a lo ancho de los 185 km de la escena. Hay técnicas para remover el efecto de la bruma (un ejemplo sencillo es el “desplazamiento” de los histogramas hacia la izquierda) y es recomendable aplicarlas sobre todo cuando se comparan imágenes de diferentes fechas para detectar cambios de cobertura (por ejemplo en estudios sobre la deforestación y recuperación de bosques). Estas técnicas se basan en el supuesto de que las condiciones atmosféricas son uniformes dentro de toda la escena, lo que es poco probable en Costa Rica. En consecuencia, tanto la corrección como la no corrección de los efectos de la bruma sobre los valores radiométricos puede introducir, o mantener, “ruidos” en los datos que dificultan una clasificación correcta de la imagen y representan un obstáculo adicional para los estudios multi-temporales, que son tan necesarios para monitorear los cambios de cobertura del suelo.
- **La topografía:** Aún desde alturas orbitales (703 km para Landsat TM) la topografía ocasiona deformaciones geométricas de montañas y valles que se manifiestan como



un desplazamiento de los picos de las montañas hacia afuera, con respecto al centro de la imagen. Este desplazamiento puede ser del orden de un pixel de 25 m para una diferencia de elevación de 300 m (Haefner *et al.*, 1992). Por lo tanto, en terrenos muy quebrados, como lo son las cordilleras de Costa Rica, las deformaciones geométricas pueden ser importantes aún después del proceso de rectificación y georeferenciación.

Aún más importante que la distorsión geométrica de la imagen, es el efecto que la topografía muy quebrada de Costa Rica tiene sobre los valores radiométricos. El ángulo de incidencia de los rayos solares varía de acuerdo con la pendiente, el aspecto y la época del año. Desde una perspectiva orbital una misma categoría de cobertura del suelo tendrá luminosidades muy diferentes, que dependen de su ubicación en laderas de pendiente y aspecto diferente. Hay varios métodos para remover el efecto de la topografía sobre los valores radiométricos medidos por el sensor. Sin embargo, la aplicación de estos métodos requiere del uso de un Modelo de Elevación Digital (MED), el cual debería tener una resolución espacial cuatro veces superior a la de la imagen (Haefner *et al.* 1992). En Costa Rica todavía no tenemos un MED con estas características de resolución y por lo tanto no podemos hacer correcciones radiométricas confiables de los efectos topográficos. Estas correcciones serían útiles para el estudio de la cobertura boscosa del país, puesto que muchas de las grandes áreas de bosque natural primario que quedan en Costa Rica se encuentran en zonas montañosas.

- El uso de **índices de vegetación**, como el NDVI (infrarrojo cercano - rojo / infrarrojo cercano + rojo), podría ayudarnos para obviar el problema de luminosidades distintas en pendientes y aspectos diferentes. Estos índices expresan los valores radiométricos como cocientes de los valores originalmente medidos por el sensor, y por lo tanto no deberían variar con la pendiente y el aspecto. Además, en algunos estudios han sido útiles para discriminar diferentes tipos de vegetación tropical (Li *et al.* en preparación). No obstante, tales resultados positivos no se han obtenido en todos los estudios realizados en bosques tropicales: por ejemplo, Sader *et al.* (1989) observaron que el NDVI estuvo más correlacionado con el aspecto y la pendiente que con



los diferentes tipos de bosque que querían discriminar. Se presume que el NDVI está correlacionado positivamente con el índice de área foliar (LAI, Leaf Area Index) el cual, a su vez, en algunos casos está correlacionado con la biomasa. Sin embargo, a valores altos del LAI, hay poca variación del NDVI, razón por la cual en las zonas húmedas del trópico, donde la vegetación es muy densa y el LAI es alto, el NDVI no ayuda necesariamente a discriminar diferentes tipos de bosques. Además, no siempre se pudo demostrar la correlación entre NDVI, LAI y biomasa, así que esta última - tan importante para calcular el contenido de carbono de los bosques - todavía no puede ser medida confiablemente con los sensores remotos actualmente disponibles (Nelson *et al.* 1988, Sader 1988).

- **La diversidad de la vegetación** de la zona tropical es otro factor que complica el análisis de las imágenes de satélite: en nuestros bosques podemos encontrar entre 40 y 100, a veces hasta 300 especies por hectárea. En comparación, hay entre 10 y 20 especies por hectárea en los bosques templados de la costa este de Norte América y entre 1 y 5 en los bosques boreales (Botkin y Lee, 1992). Esta diversidad biológica se traduce en una multitud de diferentes texturas foliares, geometrías de copas, coloraciones de hojas y flores, aberturas de las copas, gradientes de humedad en claros, copas, epífitas, etc..., que causan respuestas espectrales distintas y poco homogéneas que no siempre se pueden relacionar de manera unívoca con las categorías de cobertura del suelo que se quieren discriminar. Las firmas espectrales de diferentes tipos de bosque y de algunos cultivos tropicales resultan poco separables y causan causando más confusiones en la clasificación (errores de omisión y errores de comisión) que en situaciones como las que se encuentran en zonas florísticamente más simples y homogéneas, tales como las que se hallan en las latitudes norteamericanas. Cabe destacar que no es siempre posible discriminar espectralmente categorías de cobertura que para los fines del usuario deben clasificarse separadamente y, al revés, una misma cobertura del suelo puede tener dos o más firmas espectrales claramente distintas. Por eso, el análisis computarizado de las imágenes de satélite, que generalmente sólo hace uso de los valores radiométricos y no considera criterios tales como asociación, textura, forma, etc., no es siempre el método más conveniente para producir un mapa temático. Hay experiencias en donde se ha comprobado que



en los trópicos la interpretación visual de las imágenes puede producir resultados superiores, en términos de exactitud de la clasificación, al análisis computarizado (Tuomisto, Linna y Kalliola, 1994). Obviamente no podemos hacer de estas experiencias una regla general para los trópicos, sin embargo debemos considerar la opción de la interpretación visual como una alternativa válida (y quizás más económica) para la clasificación digital que requiere de costosos equipos y programas.

- **Misma imagen, resultados diferentes: ¿Quién tiene razón?** En muchos casos preferimos el análisis computarizado a la interpretación visual porque lo consideramos más objetivo y consistente. En cierta medida, en esto, nos equivocamos. En el análisis de las imágenes de satélite hay muchos parámetros que se escogen, aunque con criterios razonables, de manera subjetiva: las categorías de leyenda, la selección de las bandas, el cálculo de índices, la ubicación, número y tamaño de los sitios de entrenamiento y de control, el agrupamiento de las firmas espectrales, el algoritmo de clasificación, etc. Aunque existan procedimientos de análisis más ortodoxos que otros, en este trabajo no hay procedimientos y estándares internacional o nacionalmente establecidos. Dos analistas que trabajan de manera independiente con la misma imagen de satélite producirán inevitablemente dos resultados diferentes, y así lo harán diez, cien o mil analistas. El resultado de la clasificación de una misma imagen de satélite representa una muestra de una población cuasi infinita de posibles resultados. Para evitar que este hecho provoque controversias y rivalidades poco útiles al desarrollo de la ciencia y de la tecnología de la teledetección en nuestro país, sería recomendable que la comunidad científica nacional se ponga de acuerdo sobre los "mínimos" en cuanto a procedimientos e indicadores de calidad de los productos del análisis de imágenes de satélite.



ESTADO DEL CONOCIMIENTO DEL TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES DE SATELITE EN COSTA RICA

Debido a factores de tiempo, no ha sido posible realizar una investigación profunda de la capacidad técnica de las instituciones que se dedican al tratamiento digital de imágenes con diferentes propósitos (académicos y/o comerciales) y en diferentes campos, incluso el que atañe a la cuantificación de cobertura boscosa. Este tipo de trabajo requiere del inventario del recurso humano, infraestructura, equipo y programas, capacidad financiera, experiencia, etc., por lo que, sin estos criterios, no sería posible hacer un análisis objetivo de cada una de ellas. Sin embargo, es imprescindible discutir algunos aspectos importantes en cuanto al desarrollo de la tecnología durante el presente decenio.

Es innegable el gran auge que ha tenido la utilización de las imágenes de satélite en el área de los recursos naturales. Esto ha provocado que de muy pocas instituciones y personas que tenían un conocimiento sólido de esta tecnología durante el decenio pasado y que realizaban tratamiento digital de imágenes (tal el caso del CATIE), se haya pasado a una serie de instituciones con diferentes intereses (universidades, centros de investigación, organizaciones gubernamentales y no gubernamentales, fundaciones, empresas e instituciones extranjeras, etc.). Como consecuencia, durante los últimos años, el personal con conocimientos técnicos en el área de teledetección en general se ha incrementado, en algunos casos porque ha realizado estudios de especialización en el extranjero y en otros, por capacitación (existen cursos especializados en las universidades del país, pero no así un programa de postgrado en la materia). Así mismo, las aplicaciones e investigación científica que se hacen, con el uso de estas imágenes varían de institución a institución. Sin embargo, las universidades y centros de enseñanza se han centrado más en aplicaciones prácticas (en donde la clasificación de la imagen es solamente un componente) a través del desarrollo de tesis, y por razones obvias de tiempo, en pequeñas áreas. Prácticamente nulo ha sido el desarrollo de investigación para encontrar nuevas técnicas que permitan avanzar en la diferenciación de los distintos tipos de bosque tropical (inclusive las fases sucesionales del bosque secundario). A lo sumo, nuestra investigación ha estado relegada a la prueba y comparación de diferentes sensores y distintas estrategias y técnicas ya probadas en otras latitudes para evaluar su adaptabilidad a nuestras condiciones (Puig, 1996).



La proliferación de instituciones que utilizan imágenes teledetectadas ha generado, hasta cierto punto, efectos negativos en el desarrollo de esta técnica en Costa Rica. Algunas veces instituciones o personas con poca capacidad económica para adquirir imágenes “crudas” para desarrollar sus aplicaciones, han obtenido imágenes sin el consentimiento de sus dueños. Como consecuencia, las instituciones que adquieren imágenes para sus fines privados han limitado de manera drástica la cesión de datos crudos, dado las restricciones de derecho de propiedad que tienen.

Por otro lado, el hecho que varias instituciones trabajen sobre el mismo tema con poca o nula comunicación, ha generado desacuerdos en cuanto a los resultados alcanzados en los análisis de cuantificación de áreas boscosas. Estos desacuerdos podrían evitarse a través de la formulación de estándares nacionales, principalmente en lo que se refiere a la descripción de las clases informacionales, establecimiento de puntos de control para toma de firmas espectrales y estimación de errores. Además, han existido y existen muchos proyectos centroamericanos y globales (Corredor Biológico Centroamericano, PROARCA CAPAS, por citar algunos), en los que se contratan organismos foráneos (universidades o empresas privadas, generalmente norteamericanas) para que hagan la clasificación de imágenes. Los datos generados por estos proyectos son generalmente poco conocidos o de accesibilidad limitada.

Podemos concluir entonces, que a pesar de que el recurso humano y la capacidad de las instituciones por realizar aplicaciones mediante el uso imágenes de satélite se ha incrementado y mejorado en calidad en los últimos años, se ha avanzado poco en el campo de la investigación científica en esta materia y se ha generado un problema de credibilidad de los resultados de los análisis debido a la falta de un diálogo y acuerdo entre el gremio de los profesionales de la teledetección, que discuta los resultados y los productos generados y que formule las reglas del juego, tanto para los trabajos realizados por organismos nacionales como internacionales.



¿HACIA DONDE VAMOS, O HACIA DONDE QUEREMOS IR?

En lo técnico...

En lo que se refiere a los sensores que están o estarán disponibles en el futuro, se preve que varios de éstos tendrán mejor resolución espectral y espacial. El avance de la tecnología a este nivel exige de computadoras cada vez más rápidas y con mayor capacidad para almacenar datos, así como de programas especializados para el tratamiento digital de imágenes de alta resolución (nuevos algoritmos).

Se ha ofrecido que el costo de las imágenes de este tipo tenderá a la baja en el futuro, no obstante parte de esta baja se verá descompensada por el costo que tendrá el adquirir el equipo y programas necesarios para su clasificación.

Las nuevas imágenes de alta resolución, por su bajo cubrimiento en área, serían útiles, en nuestro medio, como fuentes de información detallada (muestras) en proyectos de alcance nacional, la cual luego podría ser trasladada a sensores de menor resolución para ayudar a reducir el error en la estimación de áreas boscosas. Es de hacer notar que proyectos a nivel de áreas pequeñas (microcuenca o finca) se verán beneficiados por el detalle de la información.

En lo científico...

En muchos proyectos costarricenses hemos utilizado, por falta de tiempo o limitaciones técnicas, procedimientos de análisis bien conocidos, sin intentar diseñar nuestros propios experimentos para contribuir al desarrollo de la ciencia de la teledetección. Como hemos visto arriba, nuestro país tiene características particulares que dificultan el análisis de imágenes de satélite. Hagamos de estas limitaciones un desafío científico e investiguemos soluciones innovadoras y apropiadas para nuestro medio.

Algunas ideas:

- **Integrar información geográfica en el análisis de datos espectrales.** Se han hecho pocos intentos, hasta ahora, para utilizar la información y la capacidad de análisis de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para mejorar los procedimientos de



análisis de las imágenes de satélite. La teledetección se usa para generar mapas que se ingresan al SIG, pero la posibilidad de hacer fluir información en el sentido contrario casi no se ha aprovechado. Los resultados que han obtenido estudios hechos en el extranjero han sido muy prometedores (Maselli *et al.* 1995). ¿Por qué no intentarlo en Costa Rica? Hemos mencionado las ventajas de incorporar un MED en el análisis de las imágenes; hay otras posibilidades y debemos explorarlas. Por ejemplo: la observación de campo y la literatura (Sader y Joyce 1988, Veldkamp *et al.* 1992) nos enseñan que en Costa Rica hay más bosques en áreas alejadas de las carreteras, en zonas montañosas y muy lluviosas, dentro de parques nacionales, etc. ¿Cómo cuantificar estas relaciones y luego incluirlas en la clasificación de datos espectrales?

- **Probar nuevos tipos de clasificadores:** Hemos trabajado mucho con clasificadores basados en reglas de decisión "pixel por pixel". Sabemos que los bosques tropicales tienen respuestas espectrales menos homogéneas que las de monocultivos y de bosques templados o boreales. ¿Por qué no experimentar con nuevos tipos de clasificadores, como los clasificadores por objeto o contextuales? Estos clasificadores ya han demostrado su superioridad para discriminar bosques secundarios tropicales (Foody *et al.* 1996, Li *et al.*, en preparación). ¿Podemos confirmarlo en Costa Rica?
- **Combinar diferentes tipos de sensor:** Tenemos varios tipos de sensores remotos que operan en diferentes partes del espectro electromagnético y a diferentes resoluciones (espaciales, temporales, espectrales). ¿Cómo integrar los datos de estos diferentes sensores, y como muestrear escenas de baja resolución espacial (áreas grandes) con escenas de alta resolución espacial (áreas pequeñas)?



EN LAS ACTITUDES Y LA ORGANIZACION...

En Costa Rica la experiencia con imágenes de satélite es relativamente reciente comparada con la de otros países. No obstante, trabajamos de manera aislada, bajo presión de tiempo, y recogemos información de diversas fuentes y olvidamos que nuestro medio nos pone desafíos científicos, técnicos, y económicos que debemos atender. Alrededor de 25 proyectos han cuantificado la cobertura de la tierra de parte o de la totalidad del territorio nacional utilizando teledetección. Sin embargo, en muchos casos, los datos que se generan como producto no están disponibles, no son fácilmente accesibles o sencillamente se desconoce su existencia. Es por esta razón que todos nos beneficiaríamos de un acceso más fácil a la información y a los datos que otros han generado, en poder consultar metadatos de los diferentes SIGs del país, en aprender nuevos métodos, en generar estándares de calidad nacionales y cumplirlos, en aprovechar de la experiencia y solidaridad de uno y otro, y en consolidarnos como un gremio de profesionales en teledetección y SIG.

El monitoreo del uso de la tierra (y por ende de los recursos boscosos), requiere de una densa base permanente de puntos de control bien distribuída en todo el país. Después de 25 proyectos que han utilizado o utilizan la tecnología de sensores remotos, es de esperar que exista una vasta red de estos puntos de control. El compartir estos datos y su homogenización a una leyenda común, sería un buen punto de partida y un paso hacia adelante para mejorar los productos que se generan con esta tecnología. Por supuesto que toda base de datos requiere de su mantenimiento, empresa en donde las instituciones y personas vinculadas con la tecnología podrían demostrar su buena voluntad para trabajar para el bien de la comunidad.



Bibliografía

- Botkin D. B. y M. T. Lee, 1992.* Biological Diversity and Forests. p 47-74. In: Narendra P. S. (editor), *Managing the World's Forests, Looking for Balance Between Conservation and Development.* Dubuque, Iowa, EEUU, 605p.
- Foody G. M., G. Palubinskas, R. M. Lucas, P. J. Curran, and M. Honzak, 1996.* Identifying terrestrial carbon sinks: classification of successional stages in regenerating tropical forest from Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment*, 55:205-216.
- Fournier L. A., 1997.* Fragmentos de bosques y corredores biológicos. Ponencia presentada a la reunión de expertos en conservación de bosques (en la presente memoria)
- Leclerc G., N. Beaulieu, and C. Hall, (en preparación).* Remote Sensing and Land Use Analysis For Agriculture in Costa Rica.
- Jensen J. R., 1996.* Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective. Second edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey. 316p.
- Itten K. I., P. Meyer, T. Kellenberger, Leu R., Sandmeier St., Bitter P., y Seidel K., 1992.* Correction of the impact of topography and atmosphere on Landsat TM forest mapping of alpine regions. *Remote Sensing Series*, Vol. 8. University of Zürich, Suiza. 48p.
- Li Yinghong, Paul Mausel y You Wu, 1997 (in press).* Discrimination between advanced secondary succession and mature moist forest near Altamira, Brasil, using Landsat TM data.
- Maselli F., C. Conese., T. De Filippis, and M. Romani, 1995.* Integration of ancillary data into a maximum-likelihood classifier with nonparametric priors. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 50:2-11.
- Mausel Paul, You Wu, Yinghong Li, Moran Emilio y Eduardo Brondzio, 1993.* Spectral identification of successional stages following deforestation in the Amazon. *Geocarto International*, 4:61-71



- Nelson R., R. Swift, y W. Krabill, 1988.* Using airborne lasers to estimate forest canopy and stand characteristics. *Journal of Forestry*, 86:31-38.
- Puig, J. 1996.* Identificación de fases de desarrollo de bosques secundarios húmedos tropicales de tierras bajas en Costa Rica, mediante análisis digital de imágenes de sensores remotos. Tesis Mag. Turrialba, Costa Rica. CATIE, 49p.
- Sader, S., A. 1988.* Remote Sensing Investigations of Forest Biomass and Change Detection in Tropical Regions. International Union of Forestry Research Organizations, Hytiala, Finland.
- Sader A. S., R. B. Waide, W. T. Lawrence, y A. T. Joyce, 1989.* Tropical forest biomass and successional age class relationships to a vegetation index derived from Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment*, 28:143-156.
- Sanchez-Azofeifa A. 1996.* Assessing Land Use/Cover change in Costa Rica. PhD Thesis, University of New Hampshire, 181p.
- Tuomisto H., A. Linna, y R. Kalliola, 1994.* Use of digitally processed satellite images in studies of tropical rain forest vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, 15:1595-1610.
- Veldkamp E., A. M. Weitz, I. G. Staritsky, y E. J. Huising, 1992.* Deforestation trends in the Atlantic zone of Costa Rica: a case study. *Land Degradation and Rehabilitation*, 3:71-84.