

Análisis multitemporal para la detección de cambios ocasionados por actividades de minería ilegal en la cuenca media del río Caroní, Venezuela.

¹Julio César Lezama
¹Igor da Silva Narvaes

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales - INPE
Centro Regional Sur - CRS
Av. Roraima N°. 1000 CEP: 97.105-970 Santa Maria, RS, Brasil
Caixa postal 5021-97.105-970
jcelez@gmail.com; igor@dsr.inpe.br

Abstract: As consequence of the intensification of human activities in the Caroní river middle watershed, and as a function of Venezuelan National Guard in the environmental preservation, it was used the remote sensing by the analysis of Landsat/TM images, of the years 1991, 2001 and 2010, which were submitted the Tasseled Cap transformation technique for change detection, throughout the period covered by the study area. Thus, the generation of three new components, which represent the brightness (associated with reflectance soil changes), the greenness (correlated with vegetation's vigour) and the wetness (related with vegetation and soil water contents) made it easier the reflectance homogenization in the electromagnetic spectrum, allowing a better separation of the objects at the components combination and in consequence improving the land-use and land-cover change (LULCC) determination, and in consequence the mapping precision. This allowed determining and quantifying the deforestation level and the sediment areas, as well as their evolution and the trend occurrence, arising from the illegal mining activity and other illegal activities in the area. From the analysis carried out it was confirmed the advanced of anthropized areas in 27.8% along the Caroní river, evolving over the course of the main tributaries to the northeast, mainly due by illegal mining activity.

Palabras Claves: Áreas antrópicas, deforestación, transformación *Tasseled Cap*, anthropic disturbed areas deforestation, Tasseled Cap transformation.

1. Introducción

La República Bolivariana de Venezuela se encuentra ubicada a nivel mundial dentro de los diez primeros países con mayor biodiversidad y es en la región Guayana, al sur del río Orinoco, donde se encuentra gran parte de ella, pues están estrechamente relacionadas con la historia geológica del Escudo Guayanés y la región Amazónica (Lasso et al, 2006).

Así mismo, dentro de la región Guayana se encuentra la cuenca hidrográfica del río Caroní, cuyas aguas generan más del 75 % de electricidad que se consume en el país, por medio de tres centrales hidroeléctricas y una cuarta en construcción, de gran valor estratégico para la nación (INE, 2010).

Esta cuenca hidrográfica, de gran importancia económica, presenta de acuerdo a Sánchez et al. (2007) altos niveles de fragilidad en su ecosistema, en cuanto a susceptibilidad por la intervención humana incontrolada, como la ganadería, la actividad forestal y la explotación minera generando efectos altamente negativos sobre el régimen hidrológico de la cuenca.

En ese sentido Rojas (2010), sostiene que la práctica de actividades antrópicas en esa región, además de dejar grandes espacios deforestados, convierte a los ríos en reservorios de los residuos de la actividad minera y genera un proceso de bioacumulación del metal en las especies piscícolas, que conllevan a problemas de salud a los habitantes de la región. Así, los impactos de estas actividades a este ecosistema, han contribuido al aumento en la producción de sedimentos y contaminantes que eventualmente alcanzan los embalses del Bajo Carona.

Para evitar situaciones de deterioro irreversibles, es necesario manejar integralmente la Cuenca para promover su conservación y desarrollo. Por lo tanto, la Guardia Nacional y su Dirección de Guardería Ambiental le corresponde la conducción de las operaciones en contra de toda actividad susceptible de degradar el ambiente y los recursos naturales.

Considerando la dificultad que representa el aplicar operaciones de control en la intrincada zona de la Amazonía Venezolana, la aplicación de técnicas de percepción remota en el estudio de la vegetación constituye un campo ilimitado de trabajo para diferentes profesionales en esta área (Ponzoni e Shimabukuro, 2009).

En concordancia con lo expuesto, el principal objetivo del artículo es analizar la evolución multitemporal de la actividad minera ilegal y sus consecuencias en la degradación de la cobertura vegetal y su tendencia de ocurrencia más allá del comportamiento de depositación de sedimentos ocasionados por esta actividad, en un sector de la cuenca hidrográfica média del río Caroní (Venezuela), en un período de 19 años (en los años 1991, 2001 y 2010), por medio de la técnica *Tasseled Cap* en imágenes Landsat/TM.

2. Metodología de Trabajo

2.1 Área de Estudio

El área de estudio pertenece a un sector de la imagen Landsat/TM orbita-punto 223/056, específicamente entre las coordenadas de 7° 33' 15" de latitud norte; 63° 5' 39" de longitud oeste y 7° 51' 22" de latitud norte; 62° 47' 28" de longitud oeste con un área aproximada de 900 Km², como muestra la Figura 1. Por la importancia estratégica que representa la cuenca del río Caroní para el Estado venezolano, fue seleccionada como área de estudio para el presente trabajo.

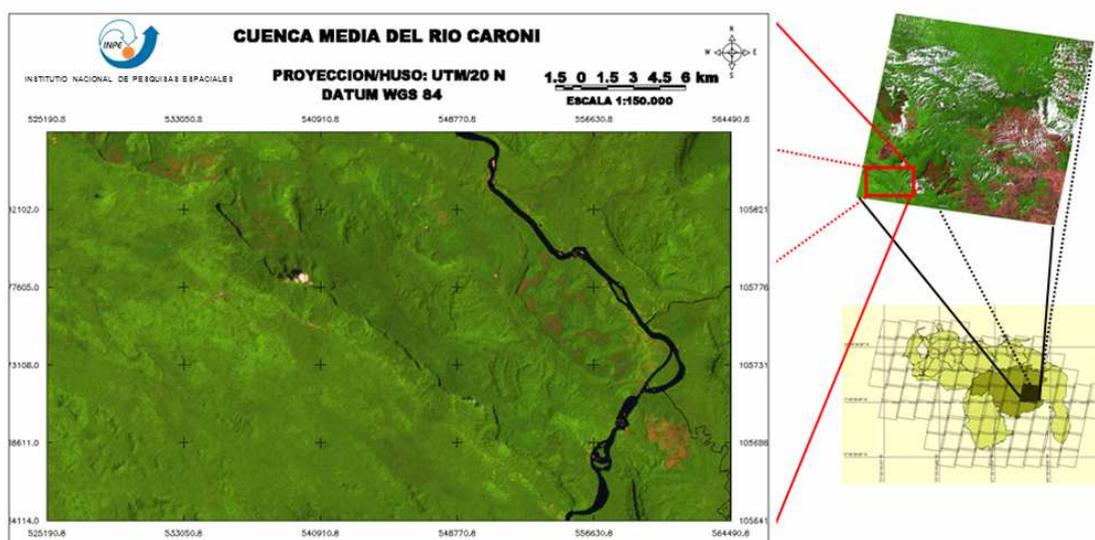


Figura 1 - Localización del área de estudio. Imagen Landsat TM, composição R(5), G(4), B(3).

Esta región se caracteriza por su abrupto relieve que va desde bajas colinas en regiones próximas a la orilla de ríos, donde no superan los 500 msnm, seguido de bajas montañas tierras intermedias entre los 500 y 1.500 msnm y por ultimo montañas areniscas abruptas las tierras altas, representadas por montañas de areniscas tabulares de paredes topos planos y acantilados verticales y planas en su cima, conocidas como Tepuy, que en algunos casos superan los 2.800 msnm (Rivera-Lombardi et al. , 2006).

Los bosques son la formación vegetal más representativa de la zona, seguida por las sabanas en conjunto con los herbazales (Senâris et al., 2009). Sin embargo, el área de estudio solo contempla vegetación boscosa.

El clima, según la clasificación de Köppen, es considerado ecuatorial o intertropical lluvioso de tipo Af. Las temperaturas oscilan, desde las más cálidas en tierras bajas, con medias anuales de 25 a 26°C a 110 msnm, hasta las frías entre 12 y 18 °C, en las áreas por encima de los 1.200 msnm.

2.2 Materiales utilizados

Fueron utilizadas las imágenes del satélite Landsat 5, sensor TM, con elemento de resolución de 30m, con las bandas 3, 4 y 5, las cuales recubren el área de estudio. Se sitúan en la órbita 223, punto 056, de fecha 11/02/1991, 10/03/2001, 30/01/2010, obtenidas del catálogo de imágenes del INPE/Brasil (2011). Además, se obtuvo una imagen ortorectificada de fecha 25/08/2004 del catálogo de imágenes de la *National Aeronautics and Space Administration* – NASA (<http://zulu.ssc.nasa.gov>), que sirvió como imagen base para la generación del registro de las demás

Las escenas geocover, referidas al mosaico global del año 2000, poseen resolución espacial de 14,25m, ortorectificadas y con precisión posicional de $\pm 50m$. Por lo tanto una escala ideal para imágenes *Landsat* de 30m de resolución y de la precisión planimétrica establecida anteriormente es de 1:100.000, considerando la extensión del área de estudio (Florenzano, 2011).

2.3 Método

Las imágenes Landsat 5 fueron incorporadas a la base de datos geográficos utilizando el *software* Spring 5.1.7 (Câmara et al., 2006), para posterior procesamiento y análisis de los productos generados.

El procedimiento metodológico para la generación y análisis de los resultados se puede ver en la Figura 2.

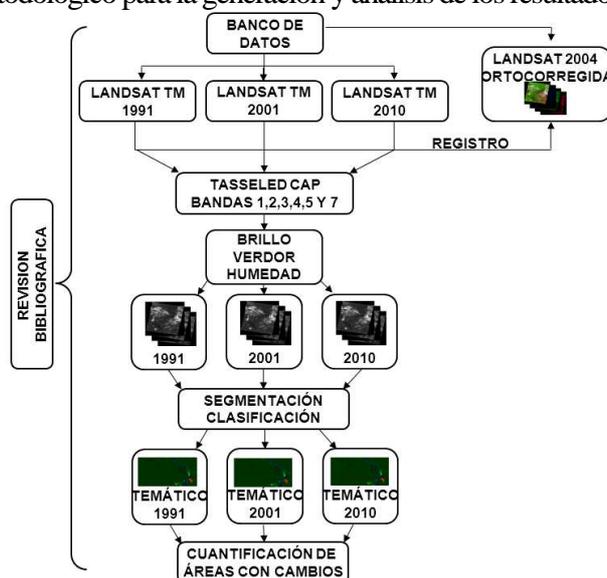


Figura 2 - Esquema metodológico aplicado para detectar las áreas afectadas.

Se realizó la corrección geométrica, donde cada una de las imágenes de este trabajo fue sometida a un proceso de registro, aplicando grado de polinomio uno para obtener un error medio cuadrático (RMS) inferior a 1 píxel, donde se tomaron 10 puntos de control comunes para cada una de las imágenes a registrar, utilizando el interpolador de vecino más próximo para no alterar los valores digitales del píxel (Moreira, 2011). La proyección cartográfica empleada es Universal Transversal Mercator (UTM), Datum WGS-84 huso 20, todo esto con el objeto de poder generar productos cartográficos.

Seguidamente se generó la transformación *Tasseled Cap*, por operación aritmética, conforme a lo establecido por Crist y Cicone (1984), en Lenguaje Espacial para Geoprocesamiento Algebraico (LEGAL), implementado en Spring. Por lo tanto la composición de las imágenes *Tasseled Cap* (brillo (R), verdor (G) y humedad (B)) fueron segmentadas por el método de crecimiento de regiones, habiendo sido probados diversos valores de similitud y de área, resultando en los parámetros de valor 8 para similitud y valor de área 16, considerado el resultado más homogéneo e ideal para el área de estudio.

La composición colorida R-brillo; G-verdor y B-humedad, donde el brillo asociado a las variaciones de reflectancia del suelo, el verdor correlacionado con el vigor de la vegetación y la humedad relacionada con el contenido de agua en la vegetación y el suelo facilitaron la homogenización de la reflectancia del espectro electromagnético, posibilitando una mejor separación de los objetivos presentes en las componentes, y en consecuencia mejorando la precisión del mapeo.

Posteriormente, se extrajo los atributos por regiones basado en algoritmos estadísticos del conjunto de regiones definido por la segmentación, se da inicio al proceso de clasificación, en estas tres componentes. En este caso se procedió a la aplicación del algoritmo de clasificación automático supervisado de *Bhattacharya* que mide la separación estadística entre un par de clases espectrales (distancia media entre la distribución de probabilidad de clases espectrales) (Moreira, 2011).

Sobre una composición de las tres componentes generadas en la transformación *Tasseled Cap*, la selección de las muestras de entrenamiento se efectuó por medio de la utilización de una clave para clasificación establecida por Espírito-Santo (2003), la cual toma en cuenta la textura e la forma de las clases de usos establecidos, bajo un ambiente de bosque tropical, habiendo sido generadas las clases temáticas de uso y cobertura definida por: suelo expuesto, bancos sedimentarios, bosque primario, bosque secundario, roca expuesta y cuerpos de agua. La imagen clasificada resultante fue sometida a interpretación visual para la edición matricial de las clases que presentaron confusión.

3. Resultados y Discusión

3.1 Evolución de la alteración de la cobertura vegetal.

Por intermedio de la generación de las tres nuevas imágenes oriundas de *Tasseled Cap*, se realizaron tres mapas temáticos de cobertura y uso de suelos de la cuenca media del río Caroní, como muestra la Figura 3 del mapa temático correspondiente a los años 1991, 2001 y 2010 demostrando la evolución de cambios ocurridos a través del tiempo, de un sector de la cuenca media del río Caroní.

1991

El análisis inicial indicó que la actividad minera ilegal de oro aun se encuentra en estado incipiente, siguiendo el curso del río Caroní y sus tributarios, aunque la agricultura de subsistencia practicada por los pueblos indígenas en la región no se puede descartar. Sin embargo, la incidencia de suelo expuesto y bosque secundario está asociada al curso de río Caroní en su parte media y sus tributarios (Figura 3a), observándose indicios de la destrucción de la capa vegetal, como una consecuencia propia de esa actividad de minería ilegal. Este patrón se considera característico para esta actividad, donde se abren pequeñas “lavras” en medio del bosque siendo que las regiones circunvecinas son utilizadas para la agricultura de subsistencia. También se aprecia la presencia de bancos sedimentarios, en algunos sectores del río, que en el primer análisis hacen parte de un proceso natural de alteraciones de meandros.

2001

Después de diez años de intensa actividad de minería ilegal (Figura 3b) representando al, donde aprecia los cambios en el uso y cobertura de suelo en la zona de estudio, ya se comienza a observar cambios en el patrón de deforestación, la actividad antrópica va alejándose de la margen del río, para internarse dentro del área boscosa, acarreadas por el aumento considerable de esta actividad.

Además de eso, es posible verificar el avance de la actividad de minería ilegal a lo largo del sector medio de la imagen donde existen pequeñas quebradas tributarias del río Caroní, que trasladan aguas abajo, material y sedimentos producto de la excesiva erosión y deposición de materiales y minerales, estando directamente vinculado con el aumento de 0,86% de los bancos sedimentarios, ocasionando el incremento de “minas de superficie” que destruyen la capa vegetal y genera remoción de material sólido para la extracción oro y como consecuencia, también la deforestación en las áreas circunvecinas para establecer algunos cultivos de subsistencia, los cuales aumenta en áreas directamente asociadas a este actividad.

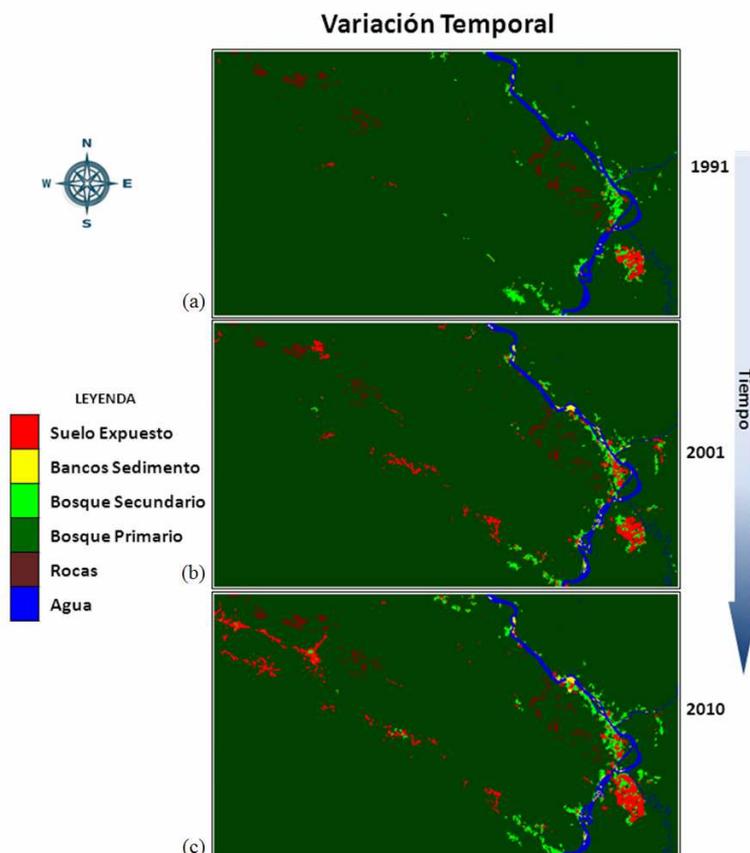


Figura 3 - Mapas temáticos correspondiente a los años 1991, 2001 y 2010 demostrando la evolución de cambios ocurridos a través del tiempo, de un sector de la cuenca media del río Caroní.

Otro factor importante está relacionado con la disminución de bosque secundarios, posiblemente relacionado al aumento de las áreas de suelo expuesto, ya que está demostrado un aumento en las áreas deforestadas a lo largo de la década por el aumento de ocupación de suelo.

2010

La evolución de la actividad de minería ilegal a lo largo del espectro de análisis puede ser visto en la Figura 3c, representado por el mapa temático del año 2010, donde aprecia los cambios en el uso y cobertura de suelo en la zona de estudio para ese periodo.

Es posible verificar una mayor presión antrópica en la región noreste del área de estudio (Figura 3c), en el sector conocido como “Sabanita de Antavari”, además de un aumento de los bancos sedimentarios en sectores del río Caroní.

La evolución del proceso de cambios ocurridas en el área de estudio para el período en análisis (años de 1991, 2001 y 2010) puede ser vista en la Figura 4, de forma comparativa.

1991 a 2001

Los resultados muestran que en los primeros diez años de análisis, entre 1991 e 2001 hubo un aumento considerable de las “áreas afectadas” del total del área de estudio. El suelo expuesto paso de representar el 0,50 % al 1,38% de toda el área en análisis con un aumento de 782,37 ha de deforestaciones; los bancos sedimentarios encontrados en el cauce del río, son un elemento muy importante a considerar pues están directamente afectados por la erosión del suelo como consecuencia de la destrucción de la capa vegetal, generando sedimentos que se acumulan en forma de bancos de arena, pasando de 0,04% a 0,19% con un aumento de 135,72 ha.

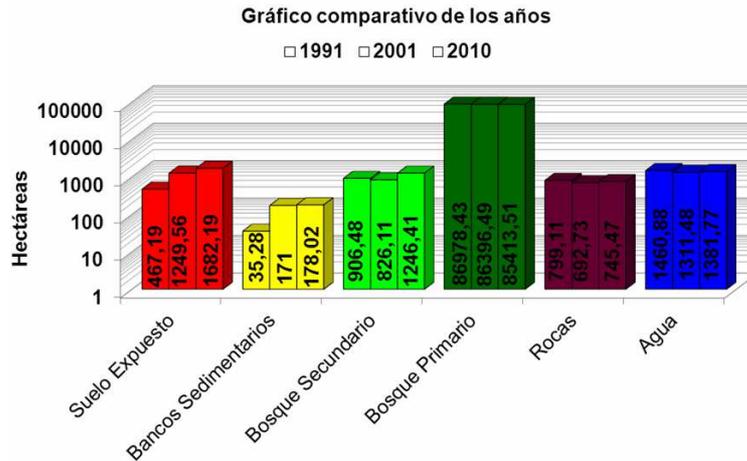


Figura 4 - Gráfico con valores por hectáreas de los Mapas Temáticos correspondiente a los años 1991, 2001 y 2010 demostrando la evolución de cambios ocurridos por efecto de las actividades antrópica en el área de estudio.

Aunque bosque secundario para este periodo haya tenido una reducción (de 0,97 a 0,91%), no significa que se recuperaron esas áreas, por el contrario, pasaron a ingresar a los valores de suelo expuesto, comprobado por la pérdida de 80,37 ha. En general la más afectada es la zona boscosa que pasó de representar el 96,08% de área total a 95,26% para un total de 581,94 de cubierta vegetal perdida.

Seguidamente un caso aislado en lo que respecta a la roca expuesta, pues pasó de 0,85% a 0,76% con una pérdida de 106,38 ha que responden a pérdida de la pequeña capa vegetal (gramínea) por causa de un incendio. Por último el elemento agua, que evidentemente se ve reducido por la aparición de los bancos de arena en el río pasando de 1,56% a 1,45% con una pérdida de casi 150 ha.

2001 a 2010

Las clases presentaron ganancias de área, a excepción del bosque primario. En este periodo repite en sumas considerables el aumento de la clase suelo expuesto de 1,38 % al 1,86% con un aumento de 432,63 ha en deforestación; los bancos de arena aumentaron en pocas proporción pasando de 0,19% a 0,20% con un aumento de 7,02 ha, demostrando una estabilización con respecto al aumento de actividades de minería ilegal.

A diferencia del primer periodo analizado, en el presente periodo, el bosque secundario aumentó considerablemente, la cual paso de 0,91% a 1,38% aumentando 420,3 ha, principalmente en la margen norte del río Caroní. Este patrón de comportamiento es la causa del abandono de estas áreas debido al posible agotamiento de potencial productivo de las minas localizadas en esta región e la posterior migración para otras regiones. Nuevamente la zona boscosa se vio afectada, pero esta vez en mayores en relación al primer periodo de análisis proporciones pasando de 95,31% a 94,23 % lo que representa la cantidad de 982, 98 ha perdidas. Seguidamente la roca expuesta gano espacios perdidos por motivado a la regeneración de gramínea lo que generó que pasara de 0,76 % a 0,82 % casi a su estado original con respecto al primer año evaluado, con una ganancia de 52,74 ha.

Por otra parte, la clase agua presento cuerpo de agua aislados y de pequeña dimensión en lugares de suelo desnudo, lo que supone son consecuencia del aumento de la actividad minera (formación de lavras mineras) para sus labores, ocasionando la destrucción de la capa vegetal, pasando de 1,45% a 1,52% lo que representa 70 ha.

3.2 Análisis de la tendencia de la alteración de la cobertura vegetal

Con base en el análisis multitemporal sobre los procesos de uso y ocupación, causado sobre todo por la actividad de minería ilegal, sin desconsiderar la actividades conexas que por el incremento de habitantes en la

región a lo largo de 19 años de análisis, fue posible generar tres mapas temáticos de tendencias sobre el proceso de ocupación en el área, como puede ser visto en la Figura 5.

En este se señalan solamente las zonas que de una u otra forma, ya sea en pérdida o en ganancia de área mostraron alteraciones en sus dimensiones. No se consideran las áreas que permanezcan sin alteración a lo largo de ese período, por lo tanto genera una idea de la relación cambio-espacio más detallados y proporcional sobre el área de estudio.

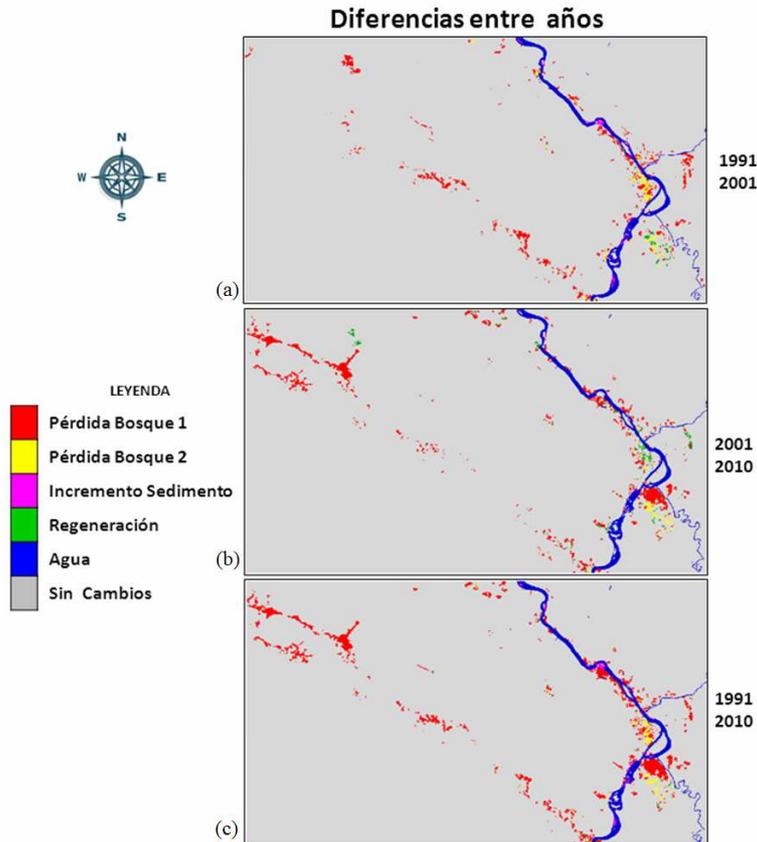


Figura 5 - Análisis sobre la tendencia de avance en el proceso de ocupación ilegal, de un sector de la cuenca media del río Caroní, en los períodos de 1991-2001 (a), 2001-2010 (b) e 1991-2010 (c).

En el análisis de estas tendencias de cambios, las áreas identificadas en color rojo representan cualquier tipo de pérdida sufrida por la clase bosque primario, pasando a convertirse en bosque secundario o suelo expuesto, mientras que el color amarillo representa todas las áreas de bosque secundario que pasaron a ser suelo expuesto, por otro lado el color fucsia muestra los cambios en relación a los bancos sedimentarios y por último el color verde representa la recuperación de la cobertura vegetal a los largo del tiempo.

En ese sentido tenemos que entre los años 1991-2001 (Figura 5a) el área antropizada representó 1410,21 ha, por solo 68,49 ha en regeneración, por su parte entre los años 2001-2010 (Figura 5b) el área antropizada presentó 1672,56 ha, por 180,03 ha de regeneración, demostrando una mayor proporción del área afecta que el primer periodo analizado pero en contraparte, también de mayor regeneración.

El análisis entre los años 1991-2010 (Figura 5c) nos muestra la realidad de los cambios en el período de análisis, alcanzando 19 años de diferencia, teniendo como resultando la presencia de 2290, 95 ha de áreas antropizadas, por tan solo 29,85 de regeneración, demostrando que el área afectada sufre un proceso de cambio de uso y cobertura intenso, causante primordial del avance de la actividad minera ilegal. A pesar de que gran parte de los cursos de agua no estén representados en la clasificación, debido a restricciones inherentes a la resolución espacial de las imágenes utilizadas (30m), la deforestación sigue un patrón de

ocurrencia, inicialmente a lo largo de los márgenes del río Caroní, siguiendo posteriormente a lo largo de sus principales tributarios.

Además de eso, el proceso de deposición de sedimentos del río, en un primer análisis considerado natural, aumentó considerablemente, principalmente en los primeros 10 años, de forma importante en el lecho del río Caroní.

4. Conclusiones

Con base en los resultados encontrados es posible concluir que:

- El uso de la transformación de *Tasseled Cap* mostró ser eficaz, ya que fue posible verificar las diferencias en el comportamiento de interacción de la radiación electromagnética solar con los diversos objetos de la superficie en el área de estudio a través del uso de técnicas de segmentación y clasificación de las imágenes brillo, verdor y humedad generados;
- El análisis multitemporal realizado hizo seguimiento a los cambios sufridos durante los 19 años evaluados, donde el aumento del área deforestada en 27,8%, indicó que la actividad de minería ilegal, representa un impacto negativo para la región, mayormente en los márgenes del río Caroní y sus tributarios.
- La utilización de sensores orbitales mostró ser de fundamental importancia en la identificación y delimitación correcta de las áreas de interés, aunque sea necesario la utilización de imágenes de resolución espacial más fina (SPOT, IKONOSII, Quickbird, ...) debido a la pequeña dimensión de muchas lavras mineras

Agradecimientos

El primer autor agradece al Curso Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica, a nivel de Especialización (INPE/CRS/CRECTEALC), por el apoyo y formación técnica para la realización de la investigación.

Referencias Bibliográficas

- Camara, G.; Souza, r. C. M.; Freitas, U. M.; Garrido, J. "Spring: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling", **Computers & Graphics**, 20: (3) 395-403, may-jun 1996.
- Crist, E. P.; Cicone, R. C. A physically-based transformation of Thematic Mapper data the TM tasseled cap. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. GE-22, n.3, p. 256-263, 1984.
- Espírito-Santo, F. B. **Caracterização e mapeamento de vegetação da região da floresta nacional do Tapajós através de dados ópticos, Radar e inventários florestais**. 2003. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- Florenzano, T. G. **Iniciación em Sensoriamento Remoto**. 3ª Edição. Oficina de Textos, 2011.
- INE - Instituto Nacional de Estadística. Gerencia de Estadísticas Ambientales. **Informe Geoambiental del Estado Bolívar**, Venezuela, Decreto N° 7.502 publicado en la Gaceta Oficial 39.451 23 de junio del 2010.
- Lasso, C. A.; Señaris, J. C.; Alonso, L. E.; flores a (Editores). **Evaluación Rápida de la Biodiversidad de los Ecosistemas Acuáticos en la Confluencia de los ríos Orinoco y Ventuari, Estado Amazonas (Venezuela)**: Boletín RAP de Evaluación Biológica 30. Conservation International. Washington DC, USA: Library of Congreso, 2006.
- Moreira, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 4ª Ed. Viçosa: UFV, 2011.
- Ponzoni, F. J.; Shimabukuro, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. Parêntese, 1ª Ed., 2007.
- Rivera-Lombardi, R. J.; Padrón, J. L.; Huber, O.; Linares, I. **Propuesta de zonificación de uso del sector occidental del Parque Nacional Canaima. Estado Bolívar**. Terra Nueva Etapa, v. XXII, n. 32, p. 77-122, 2006.
- Rojas, M. Exposición ambiental y humana al mercurio en Venezuela: Período 2004-2008. **Revista de la Facultad de Ciencias de la Salud. Universidad de Carabobo**, v. 14, n 2, p. 33-40, Agosto 2010.
- Sánchez, T. B.; Vessuri, H.; Rosales, J. **Una revisión del plan de manejo de la cuenca del río Caroní Venezuela, desde una perspectiva de la valoración del recurso hídrico**. TALLER "GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO GIRH" realizado en Ciudad Guyana en julio 2007.
- Señaris, J. C.; Lew, D.; Lasso, C. A. **Biodiversidad del Parque Nacional Canaima: Bases técnicas para la conservación de la Guayana venezolana**. Caracas: Fundación La Salle de Ciencias Naturales y The Nature Conservancy, 2009. 256 p.