

Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Forestal

Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Forestal

Aplicación de CLASlite como herramienta para monitorear
deforestación y degradación de los bosques en la Región
Norte-Atlántica de Costa Rica

Andreina Malavasi Pastrana
Profesor guía Ph.D Edgar Ortíz Malavassi

Cartago, Costa Rica

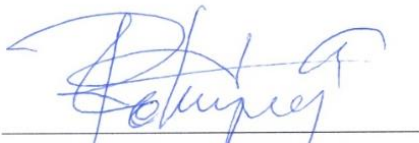
2015

Constancia de Aprobación

Aplicación de CLASlite como herramienta para monitorear deforestación y degradación de bosques de la Región Norte-Atlántica de Costa Rica

Proyecto final de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal.

Jurado Examinador



M.Sc. Johnny Rodríguez
Chacón



Lic. Dorian Carvajal
Vanegas



Director de Tesis
Ph. D. Edgar Ortiz Malavasi

Dedicatoria

El trabajo realizado se lo dedico a mis padres, que me han apoyado a lo largo de mi vida y han sido los que me han inculcado los valores para ser una persona de bien.

Son los responsables de mi bienestar y de brindarme todas las condiciones necesarias para poder concluir este proceso de cinco años. A mi hermano que ha sido una persona que ha estado ahí siempre que lo he necesitado y ha sido un ejemplo de paciencia y perseverancia a lo largo de mi vida.

Agradecimientos

A todos mis profesores de la escuela de Ingeniería Forestal que han estado anuentes a compartir todos sus conocimientos que han sido claves para que seamos grandes profesionales.

Al profesor y tutor Ph. D Edgar Ortíz Malavasi, por su valiosa colaboración y orientación para la realización de este trabajo.

A MSc. Johnny Rodríguez Chacón, supervisor del proyecto por parte de FUNDECOR (Fundación para el desarrollo de la Cordillera Volcánica Central), por toda la colaboración y paciencia durante el proyecto.

A MBA. Luis Aguilar, director de la gerencia de Investigación, Desarrollo e Innovación Tecnológica de FUNDECOR por todo el apoyo y disposición para poder realizar este proyecto de la mejor manera.

A toda la familia de FUNDECOR en Puerto Viejo de Sarapiquí por toda la colaboración brindada para la realización del trabajo de campo.

A Randy y a Diego por su colaboración en el trabajo de campo.

A doña Cecilia por atenderme tan bien en su casa.

En especial a FUNDECOR por el financiamiento de este proyecto.

A los dueños de las fincas donde se realizó el estudio.

Tabla de contenidos

Constancia de aprobación	
Dedicatoria	
Agradecimientos	
Capítulo 1	1
Artículo Científico	1
Resumen	2
Palabras claves	2
Abstract	3
Keywords	3
Introducción	4
Material y Métodos.....	6
Selección de imágenes.....	6
Procesamiento de las imágenes.....	6
Selección de fincas	8
Descripción del área de estudio.....	9
Análisis visual de las coberturas.....	10
Diseño para deforestación.....	10
Diseño para degradación.....	10
Análisis estadístico.....	12
Resultados y discusión.....	12
Imágenes procesadas por CLASlite.....	12
Estadísticas de deforestación.....	13
Estadísticas de degradación.....	14
Validación en campo.....	15
Deforestación.....	18
Degradación.....	19
Contabilización de errores.....	23

Conclusiones.....	24
Recomendaciones.....	25
Referencias.....	25

Tabla de Figuras

Figura 1. Ubicación de las fincas muestreadas sujetas a convenio con FUNDECOR.....	9
Figura 2. Porcentajes de deforestación determinados por CLASlite para las diferentes provincias de Costa Rica en los periodos 2001-2005 y 2005-2010.....	13
Figura 3. Porcentajes de deforestación determinados por CLASlite en el periodo 2014-2015 para las diferentes provincias de Costa Rica.....	13
Figura 4. Porcentajes de degradación determinados por CLASlite para las diferentes provincias de Costa Rica en los periodos 2001-2005 y 2005-2010.....	14
Figura 5. Porcentajes de degradación determinados por CLASlite en el periodo 2014-2015 para las diferentes provincias de Costa Rica.....	14
Figura 6. Sitio A: Pasto arbolado y Sitio B: Plantación de <i>Gmelina arborea</i>	18
Figura 7. Sitio C y D: Deforestación natural en bosque.....	18

Tabla de cuadros

Cuadro 1. Información de las fincas muestreadas.....	8
Cuadro 2. Porcentaje de área cubierta por las imágenes procesadas Landsat 8.....	12
Cuadro 3. Información de los sitios visitados para la validación de los datos de campo.....	15
Cuadro 4. Porcentaje de error para los sitios deforestados señalados por CLASlite.....	18
Cuadro 5. Datos de área basal de las parcelas testigo y de degradación montadas en los diferentes sitios de muestreo.....	19
Cuadro 6. Prueba T para la variable área basal por hectárea.....	20
Cuadro 7. Datos de biomasa de las parcelas testigo y de degradación montadas en los diferentes sitios de muestreo.....	21
Cuadro 8. Prueba T para la variable biomasa por hectárea.....	21
Cuadro 9. Datos de luminosidad de las parcelas testigo y de degradación montadas en los diferentes sitios de muestreo.....	22
Cuadro 10. Prueba de normalidad Shapiro- Wilk para el porcentaje de luminosidad.....	22
Cuadro 11. Prueba Wilcoxon para el porcentaje de luminosidad.....	22
Cuadro 12. Porcentaje de error para los sitios degradados señalados por CLASlite.....	23

Capítulo 1

Artículo Científico

Aplicación de CLASlite como herramienta para monitorear deforestación y degradación de bosques en la Región Norte-Atlántica de Costa Rica

Aplicación de CLASlite como herramienta para monitorear deforestación y degradación de bosques en la Región Norte-Atlántica de Costa Rica

Andreina Malavasi Pastrana

Resumen

La deforestación y degradación de los bosques son procesos que han conducido a los ecosistemas boscosos a un deterioro temporal o permanente de la densidad y la composición de especies, afectando su capacidad productiva. Ambos procesos son difíciles de monitorear por lo que se ha propuesto la utilización del programa CLASlite. Se procesaron imágenes Landsat de los años 2014 y 2015, luego se realizó una validación en campo de los datos generados por CLASlite. Se visitaron sitios deforestados, degradados y testigo en las diferentes fincas bajo contrato con FUNDECOR, donde se establecieron parcelas circulares de 15 metros de radio en las cuales se evaluó el área basal, la biomasa arriba del suelo y el porcentaje de luminosidad. La comprobación de campo evidenció diferencias significativas entre los sitios evaluados, se determinó que los sitios que CLASlite identificó como degradados, presentan menor área basal y biomasa arriba del suelo pero para el porcentaje de luminosidad se encuentran valores mayores en comparación a los sitios testigo. En el caso de deforestación, la validación de campo evidenció un error de un 66,67% del total de los sitios visitados. La comprobación de campo indica que el uso de CLASlite es un método preciso para el monitoreo de la degradación forestal, sin embargo no se recomienda para efectos del monitoreo de deforestación.

Palabras claves: Deforestación, degradación forestal, CLASlite, sensores remotos, Landsat, área basal, biomasa, porcentaje de luminosidad.

Abstract

Deforestation and forest degradation are processes that have led forest ecosystems to a temporary, sometimes permanent, deterioration of the species' density and composition, which affects their productive capacity. Since both processes are difficult to monitor, the use of CLASlite program has been proposed. Landsat images of the years 2014 and 2015 were first processed with CLASlite, then a validation of the results was completed in the field. Deforested, degraded and control sites in the different farms under contract with FUNDECOR were visited. Circular plots of 15 m radius were established in these sample sites, and basal area, above ground biomass, and brightness percentage were calculated. The field test showed significant differences between the tested locations. CLASlite degraded sites have lower basal area and above ground biomass, and higher brightness percentage values than the control sites. With respect to the sites that CLASlite identified as deforested, the field validation shows a classification error of 66.7%. Therefore, the field test indicates that the use of CLASlite is an accurate method for monitoring forest degradation; nevertheless, it is not recommended for monitoring deforestation.

Keywords: Deforestation, forest degradation, CLASlite, remote sensing, Landsat, basal area, biomass, brightness percentage.

Introducción

Según El Grupo de Expertos sobre el Cambio Climático en el cuarto informe (IPCC, 2007), se estima que el 17,4 % de las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por el sector forestal proviene de fuentes antropogénicas, las cuales en su mayoría son provocadas por la deforestación y degradación de los bosques.

La deforestación es una causa de la pérdida de la diversidad biológica a nivel genético, poblacional y ecosistémico. Es un proceso provocado casi siempre por la acción humana, que por consecuencia origina un cambio en el uso del suelo (Aguilar, Martínez & Arriaga, 2000) y muchas veces el deterioro de los ecosistemas naturales.

Hirata, Takao, Sato & Toriyama (2012) definen la degradación forestal como el proceso que ocurre en un ecosistema donde ha existido una reducción del volumen de almacenamiento de carbono, lo que ha generado una menor capacidad productiva del ecosistema. Sin embargo, Grainger (2013) menciona que es un proceso en donde se ha llevado a cabo un deterioro temporal o permanente de la densidad, la estructura vegetal y la composición de especies; por lo tanto para determinar la verdad sobre este concepto se debe hacer un seguimiento de al menos un par de décadas (Lipper, 2000).

Cabello & Paruelo (2008) indican que existe tecnología que ha permitido dar seguimiento a la deforestación y degradación, como es la teledetección, el cual ha sido capaz de describir aspectos funcionales de los sistemas ecológicos y de brindar información sobre la estructura del bosque, por medio de un tratamiento digital de las imágenes, basado en la clasificación de los píxeles en función de su comportamiento reflexivo (Angulo, Suárez & López, 2013).

La unidad de Ecología Global del Instituto Carnegie de la Universidad de Stanford, ha diseñado un software libre, CLASlite (Carnegie Landsat Analysis System) el cual ha sido utilizado para la identificación altamente automatizada de la deforestación y la degradación de los bosques, a través de imágenes satelitales (Asner, Páez, Knapp, Balaji & Clark, 2009).

El presente estudio pretende determinar la deforestación y degradación de los bosques de la región Norte-Atlántica de Costa Rica, por medio de la aplicación de la herramienta CLASlite en el procesamiento de las imágenes satelitales Landsat de los años 2001, 2005, 2010, 2014 y 2015. Los resultados generados por CLASlite luego se validan por medio de la toma de datos de campo, donde se cuantifica el área basal, la biomasa arriba del suelo y el porcentaje de

luminosidad de sitios degradados y testigo que se encuentren en las diferentes propiedades con convenios con la Fundación para el Desarrollo de la Cordillera Volcánica Central (FUNDECOR).

Material y métodos

Selección de las imágenes. Para este estudio se utilizaron imágenes Landsat 5, 7 y 8. Se utilizó el path 15 y raw 53 para ubicar la región Norte-Atlántica de Costa Rica.

Las imágenes se obtuvieron del sitio oficial del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Se descargaron las imágenes de enero 2001, diciembre 2005, noviembre 2010, febrero 2014 y mayo 2015, se seleccionaron las que presentaron mejores características de acuerdo a la presencia de nubes y sombra de nubes.

Procesamiento de las imágenes. El procesamiento generado por CLASlite consta de cinco etapas:

- a) *Preparación de las imágenes.* El software CLASlite por medio de la herramienta “Prepare Landsat” hace una preparación previa para que las imágenes puedan ser procesadas. La herramienta georreferencia las imágenes a una proyección UTM zona 16 y genera tres archivos (1 imagen cruda, 1 imagen térmica y en el caso de las imágenes Landsat 8 genera un archivo de calidad).
- b) *Calibración a reflectancia.* En este procedimiento se ejecutaron tres técnicas:
 - Corrección radiométrica. Con esta técnica se calibraron los datos de cada pixel de las imágenes, a partir de unidades con número digitales a unidades de radiancia.
 - Corrección atmosférica. Se minimizaron los problemas ocasionados por factores atmosféricos como por ejemplo pixeles que contengan neblina.
 - Enmascaramiento. CLASlite requiere de datos de radiancia para determinar la reflectancia de cada pixel y así poder obtener la información sobre la cobertura de la vegetación, en este paso se eliminaron las nubes, sombras de nubes, sombras del terreno y agua por medio de la función *Fmask*, ya que para estas clases el programa CLASlite no logra detectar los valores de radiancia.

Se utilizaron los siguientes parámetros:

Número dilatado de píxeles para nubes (cldpix): 3

Número dilatado de píxeles para sombra de nubes (sdpix): 3

Número dilatado de píxeles para nieve (snpix): 0

Umbral de probabilidad de nube (cldprob): 22,5

c) *Cobertura fraccional*. En este paso se determinó la cobertura fraccional de cada píxel de la imagen, se segregó en tres coberturas fraccionales: vegetación viva del dosel (PV), vegetación muerta (NPV), y superficie descubierta (S).

Asner, Tasar, Sousan & Knapp (2013) mencionan que la descomposición y clasificación de coberturas fraccionales se generó por el método AutoMCU (Segregación Espectral Automatizada Monte Carlo) creado por CLASlite, el cual utiliza la siguiente ecuación:

$$p(\lambda)_{pixel} = \sum [c_e \cdot p(\lambda)_e] + \varepsilon = [c_{pv} \cdot p(\lambda)_{pv} + c_{npv} \cdot p(\lambda)_{npv} + c_s \cdot p(\lambda)_s] + \varepsilon$$

Donde $p(\lambda)_e$ es la biblioteca de firmas de reflectancia, c_e es la fracción cubierta por el píxel, PV es la vegetación fotosintética, NPV es la vegetación no fotosintética, S es la superficie descubierta y ε es el error total.

Este método calculó la media, desviación estándar de las tres coberturas fraccionales y el error medio cuadrático (RMSE) de las imágenes.

d) *Clasificación de la cobertura boscosa*. Se clasificó cada píxel en cobertura de bosque y no bosque por medio del árbol de decisiones simples sugerido por CLASlite, esto es:

Bosque: $PV \geq 80$ y $S < 20$

Área no boscosa: $PV < 80$ y $S > 20$

e) *Detección del cambio del bosque*. Se detectó el cambio del bosque que ocurre entre las imágenes que se compararon de los periodos del 2001-2005, 2005- 2010 y del 2014 al 2015.

Para el cálculo de las imágenes de deforestación y degradación de la cobertura, se utilizaron los siguientes árboles de decisión propuestos por Asner et al. (2013).

- Deforestación

Disminución de PV: $((PV_1 - PV_2) \geq 25)$
 Incremento de: S $((S_1 \leq 5) \text{ y } ((S_2 - S_1) \geq 15))$ ó
 Incremento de NPV: $((PV_2 < 80) \text{ y } ((NPV_2 - NPV_1) \geq 20))$

- Degradación

$((((NPV_2 - NPV_1) \geq 10) \text{ y } ((PV_1 - PV_2) > 10)) \text{ ó})$
 $((S_1 \leq 5) \text{ y } ((S_2 - S_1) > 10) \text{ y } (S_2 \leq 15))$

Donde PV_1 es la primera imagen de la fracción de vegetación fotosintética, PV_2 es la segunda imagen de la fracción de vegetación fotosintética, NPV_1 es la primera imagen de la fracción de vegetación no fotosintética, NPV_2 es la segunda imagen de la fracción de vegetación no fotosintética, S_1 es la primera imagen de la fracción de la superficie expuesta y S_2 es la segunda imagen de la fracción de la superficie expuesta.

Validación de datos de campo

Selección de fincas. Luego de haber procesado las imágenes con CLASlite se procedió a utilizar la herramienta “Identity” de ArcGis, para crear una capa que contenía solo las fincas bajo convenios de FUNDECOR, que contaban con algún grado de deforestación y degradación.

Cuadro 1. Información de las fincas muestreadas, (Fuente FUNDECOR, 2015).

	Finca	Convenio *
	1	2007038
Bloque 1	2	2003015, 2002016 y 2005005
	3	2006043A
Bloque 2	4	2006049
	5	2009013
Bloque 3	6	2009012
Bloque 4	7	2013055

*Los números de convenios son importantes para efectos de FUNDECOR.

Descripción del área de estudio. La comprobación de campo se realizó en 7 fincas sujetas a convenios con FUNDECOR en donde se identificó deforestación y degradación forestal, según CLASlite para el periodo 2014-2015.

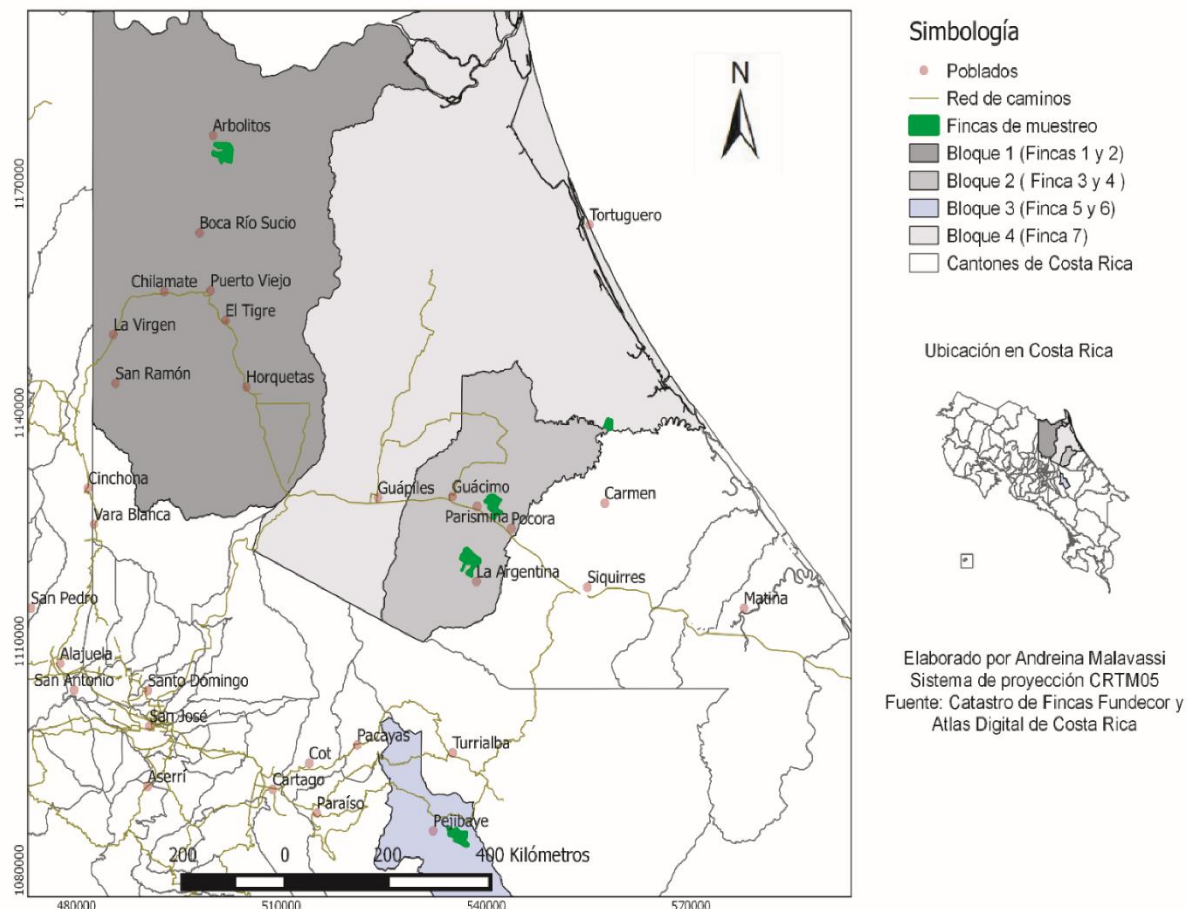


Figura 1. Ubicación de las fincas muestreadas sujetas a convenio con FUNDECOR.

Zonas de vida. Las fincas 3, 5 y 6 se encuentran en la zona de vida bosque muy húmedo premontano (bmh-P) (TEC, 2014). Esta cuenta con un rango de temperatura que varía entre los 18-24 °C y una precipitación entre 2000-4000 mm (Bolaños, Watson & Tosi, 2005).

Según el mapa ecológico de Costa Rica de Bolaños, Watson & Tosi (2005) se indica que las fincas 1, 2, 4 y 7 se ubican dentro de la zona de vida bosque muy húmedo tropical (bmh-T) (TEC, 2014), donde la temperatura ronda entre los 24-30 °C y un rango de precipitación de los 4000 a los 8000 mm.

Suelos. Las fincas 1, 2, 5 y 6 se encuentran dentro del orden ultisol (TEC, 2014), los cuales se caracterizan por tener una coloración rojiza ya que han estado sujetos a procesos de constante lixiviación, estos son muy comunes en climas cálidos-húmedos que tienen un déficit estacional de precipitación (Fadda, 2009). Bertsch, Mata & Henríquez (1993) mencionan que en ellos se produce toda la piña del país.

Las fincas 3, 4 y 5 se localizan dentro del orden inceptisol (TEC, 2014), el cual está ampliamente distribuido por todo el país. Estos suelos permiten una amplia gama de producción agropecuaria, ganadería, bosque de producción, entre otras (Bertsch et al., 1993).

Análisis visual de las coberturas. Previo al muestreo en campo se georreferenciaron los sitios de muestreo donde existió deforestación, degradación, y donde no se presenta ninguna condición de estas según CLASlite para el periodo 2014-2015. Esta selección se hizo por medio del uso del plano de cada finca e imágenes satelitales de alta resolución.

Diseño para deforestación. Se visitó cada uno de los sitios georreferenciados donde CLASlite determinó deforestación y se evaluó la presencia o ausencia de ésta.

Diseño para degradación. En cada uno de esos sitios donde se identificó degradación se estableció una parcela circular de 15 metros de radio. Dentro de cada parcela se identificaron los árboles a nivel de especie, se midió el diámetro a la altura del pecho (d) de los árboles con un diámetro mayor o igual a 10 cm ($d \geq 10$ cm), se midió la altura cada 10 árboles medidos con un clinómetro y se determinó el porcentaje de luminosidad de la parcela con un densímetro convexo. Junto a esa primera parcela se estableció una parcela testigo en un sitio que estuviera fuera del área degradada y se midieron las mismas variables mencionadas anteriormente.

Cuantificación del área basimétrica por árbol. Se utilizó la fórmula mencionada por Ugalde (1981) para calcularla.

$$G = \frac{\pi}{4} * d^2$$

Donde G es el Área basal (m²) y d es el diámetro a la altura del pecho (cm).

Cuantificación de la biomasa arriba del suelo. La biomasa aérea por árbol fue calculada por medio de la ecuación propuesta por Chave et al. (2014).

$$AGB = 0,0673 * (pd^2 h)^{0,976}$$

Donde AGB es la biomasa arriba del suelo por árbol y palmas arriba de 10 cm de diámetro (kg), p es la densidad de la madera por especie (en gcm^{-3}), d es el diámetro (en cm), y h es la altura calculada (en m).

Mediante la revisión de literatura de las bases de datos propuestas por Reyes, Brown, Chapman & Lugose (1992) y Zanne, López-González, Coomes, Ilic, Jansen, Lewis & Chave (2009) se encontraron los valores de densidad para cada una de las especies que se identificaron en las parcelas de muestreo. Cuando no se encontró información sobre la densidad de la especie se aplicó un valor promedio de $0,5 g cm^{-3}$ para esas especies y de igual forma para las que no se lograron identificar en el campo.

Cálculo de altura. Para el cálculo de la altura se utilizaron las ecuaciones propuestas por Ortiz (1997).

$$h = 3.7802 * d^{0,5236} \quad (1)$$

$$h = 4.00048 * d^{0,5236} * e^{-0.0040d} \quad (2)$$

$$h = 1.9550 * d^{0,8487} * e^{-0.0085d} \quad (3)$$

La ecuación 1 se aplicó para el género *Vochysia sp*, la ecuación 2 para las especies esciófitas y la ecuación 3 se utilizó para el resto de las especies.

Para el cálculo del área basal, y de la biomasa arriba del suelo por parcela se hizo una sumatoria del área basal y de la biomasa aérea de todos los árboles presentes en el sitio, los resultados de estos datos se extrapolaron por hectárea.

Porcentaje de luminosidad. Se realizaron 4 mediciones en cada parcela con un densímetro convexo, luego se hizo la sumatoria de las mediciones y se multiplicó por un valor de 1,04, el cual es el recomendado por el instrumento. Finalmente se calculó el promedio por parcela.

Análisis estadístico. Las pruebas de hipótesis se realizaron usando comparaciones de medias apareadas con “t-Student” para los conjunto de datos de área basal, biomasa arriba del suelo, y porcentaje de luminosidad. Los análisis se realizaron usando las pruebas estadísticas disponibles en Excel versión 2013, y en caso de las pruebas no-paramétricas se utilizó el programa PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis.

Resultados y discusión

Imágenes procesadas por CLASlite. Se obtuvieron las imágenes de deforestación y degradación de los periodos 2001-2005-2010 y 2014-2015. Para el caso de la imagen del periodo 2001-2005-2010 se muestran valores de 0, 1 y 2. Dónde el valor 0 significa que no existió cambio, 1 donde se evidenció deforestación y degradación en los años 2001-2005 y el valor 2 señala el cambio detectado en los años 2005-2010. Para la imagen de los años 2014-2015 solo se obtienen valores de 1 y 0.

El cuadro 2 señala el porcentaje de área de cada provincia presente en las imágenes Landsat procesadas por CLASlite, las cuales corresponden al path 15 y raw 53, dentro de la cual se encuentra la zona de influencia de FUNDECOR. Cabe destacar que estos son resultados obtenidos directamente de las imágenes de CLASlite por que no han pasado por ningún proceso de validación de campo.

Cuadro 2. Porcentaje de área cubierta por las imágenes procesadas Landsat 8.

Provincia	Porcentaje de área cubierta (%)
Alajuela	100,00
Heredia	100,00
Cartago	100,00
San José	100,00
Puntarenas	60,39
Limón	100,00
Guanacaste	0,20

Estadísticas de deforestación. La figura 2 muestra los porcentajes de deforestación calculados por CLASlite para el periodo 2001-2005 donde la provincia de San José obtuvo el mayor porcentaje de deforestación con 26,77%. De igual forma en el periodo 2005-2010 el mayor porcentaje de deforestación lo presentó la provincia de Heredia con un 31,55%, seguido por Alajuela y Limón con 30,9% y 30,3% respectivamente.

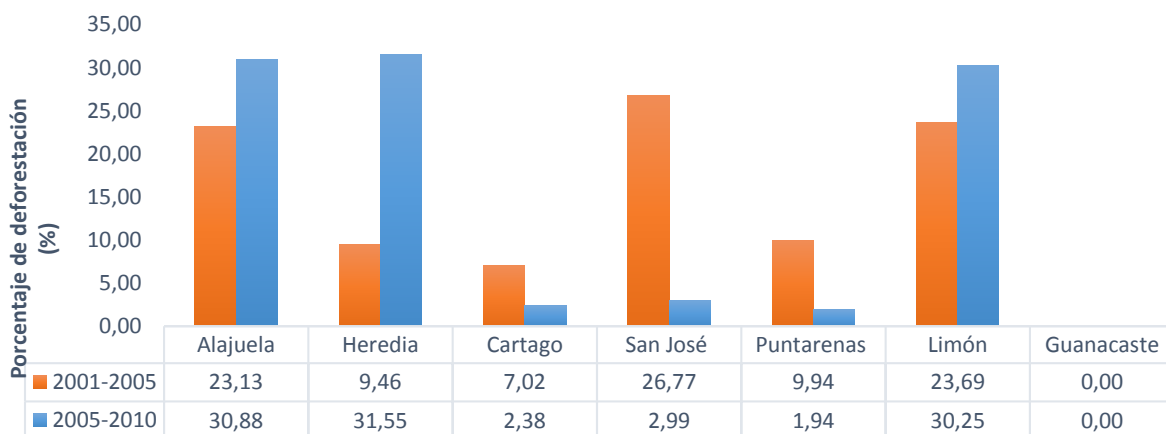


Figura 2. Porcentajes de deforestación determinados por CLASlite para las diferentes provincias de Costa Rica en los periodos 2001-2005 y 2005-2010.

Según los resultados de las imágenes de deforestación generadas por CLASlite para el periodo 2014-2015, la provincia de Alajuela es la que presentó el mayor porcentaje de deforestación con un 32%, seguido por San José con un 30,9% (Figura 3).

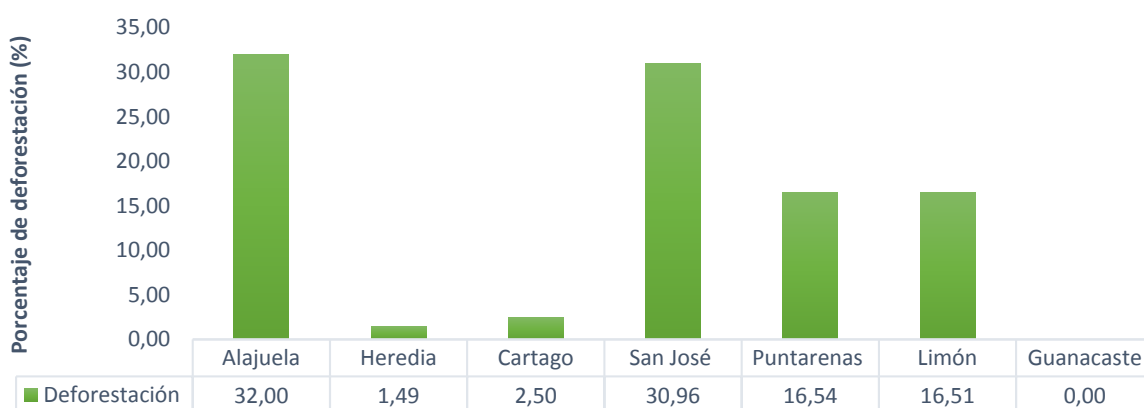


Figura 3. Porcentajes de deforestación determinados por CLASlite en el periodo 2014-2015 para las diferentes provincias de Costa Rica.

Estadísticas de degradación. La degradación identificada por CLASlite en los periodos 2001-2005 y 2005-2010 se muestra en la figura 4. La provincia de San José presenta el mayor porcentaje de degradación para el periodo 2001-2005 con un valor de 23,80%, mientras que en el periodo 2005-2010 las estadísticas cambiaron, la provincia de Heredia fue la que presentó el mayor porcentaje de degradación con un 34,45%.

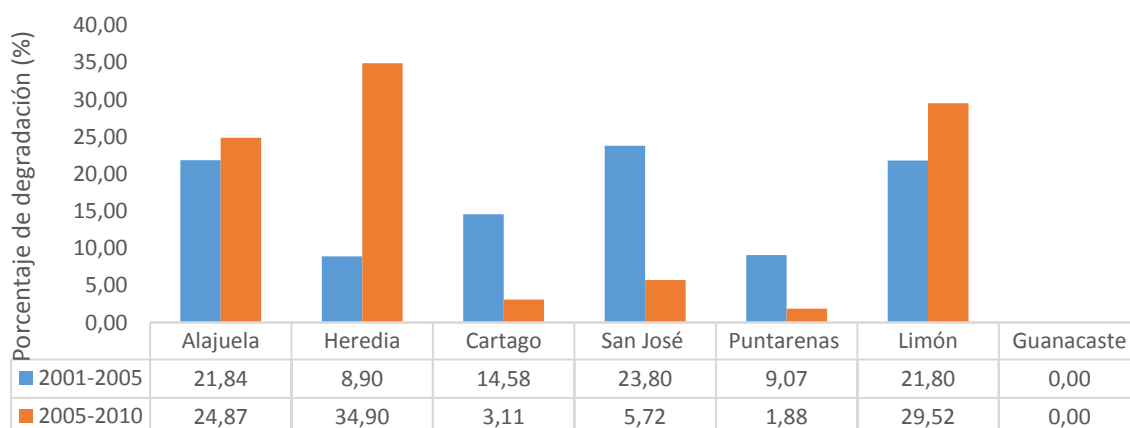


Figura 4. Porcentajes de degradación determinados por CLASlite para las diferentes provincias de Costa Rica en los periodos 2001-2005 y 2005-2010.

El mayor porcentaje de degradación de bosques en el periodo 2014-2015 lo presentó nuevamente la provincia de San José con un 23,8% (Figura 5).

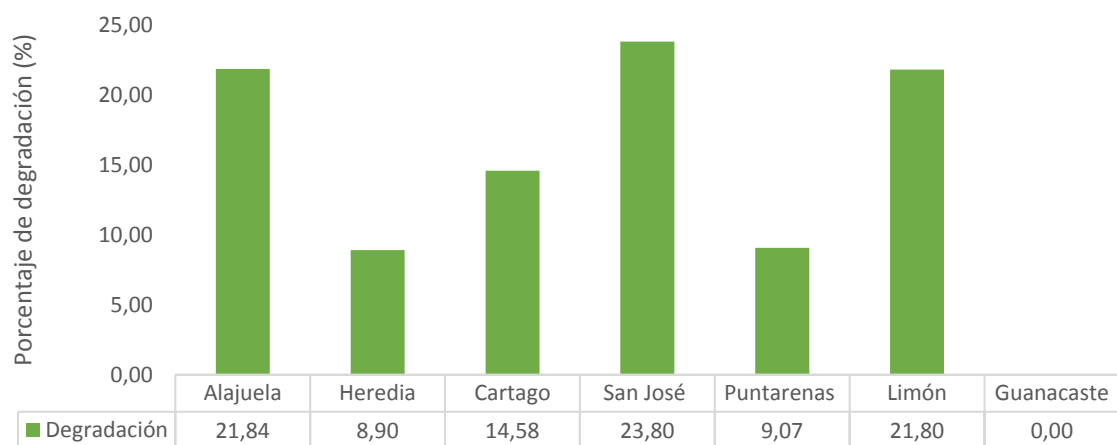


Figura 5. Porcentajes de degradación determinados por CLASlite en el periodo 2014-2015 para las diferentes provincias de Costa Rica.

Validación de campo.

El cuadro 3 muestra la información de los sitios visitados en cada una de las fincas durante el proceso de validación. En algunos casos CLASlite señaló la presencia de deforestación o degradación, sin embargo en las visitas de campo se comprobó que algunos sitios no presentaban una cobertura boscosa, por lo que se contabilizaron como errores del programa.

Cuadro 3. Información de los sitios visitados para la validación de los datos de campo.

Sitio	CLASlite	Campo	Observaciones en campo	Presencia de error
1	Degradación	Plantación	Plantación de <i>Vochysia ferruginea</i> de aproximadamente 5 años.	Sí
2	Deforestación	Potrero	El sitio era un potrero de aproximadamente 10 años.	Sí
3	Testigo	Bosque	Se observó que el bosque se encontraba en un área anegada. La finca presentaba manejo de bosque.	No
4	Degradación	Bosque	El sitio era un bosque que colindaba con un área. La finca presentaba manejo de bosque.	No
5	Testigo	Bosque	El sitio era un bosque que se encontraba en un área anegada. La finca presentaba manejo de bosque.	No
6	Testigo	Bosque	El sitio era un bosque que colindaba con un área anegada.	No
7	Degradación	Potrero	El sitio era un potrero desde hace 10 años. La finca no presenta manejo de bosque solamente manejo de las plantaciones forestales.	Sí
8	Deforestación	Bosque	Se presentaban árboles caídos de forma natural. La finca no presenta manejo de bosque solamente manejo de las plantaciones forestales.	No

9	Degradación	Bosque	Se observaba que en el sitio se realizó una extracción de Palmito. En la finca no se ha realizado ningún tipo de manejo de bosque.	No
10	Testigo	Bosque	Se encontraba una quebrada a los 25 metros. En la finca no se ha realizado ningún tipo de manejo de bosque.	No
11	Deforestación	Plantación	Plantación de <i>Gmelina arborea</i> de aproximadamente 7 años, no se presentaron árboles caídos.	Sí
12	Deforestación	Bosque	No se observó ningún tipo de deforestación. En la finca no se ha realizado ningún tipo de manejo de bosque.	Sí
13	Deforestación	Bosque	No se observó ningún tipo de deforestación. En la finca no se ha realizado ningún tipo de manejo de bosque.	Sí
14	Deforestación	Bosque	No se observó ningún tipo de deforestación. En la finca no se ha realizado ningún tipo de manejo de bosque.	Sí
15	Degradación	Plantación	Plantación de <i>Gmelina arborea</i> de aproximadamente 6 años.	Sí
16	Degradación	Plantación	Plantación de <i>Gmelina arborea</i> de aproximadamente 6 años.	Sí
17	Deforestación	Bosque	No se presentó ningún tipo de deforestación. En la finca no se ha realizado ningún tipo de manejo de bosque.	Sí
18	Testigo	Bosque	Sitio con una pendiente aproximadamente de 40%. En la finca no se ha realizado ningún tipo de manejo de bosque.	No

19	Deforestación	Bosque	Se observaron árboles caídos de forma natural.	No
20	Degradación	Bosque	Se observó que en el sitio entraba una gran cantidad de luz. En la finca no se ha realizado ningún tipo de manejo de bosque.	No
21	Degradación	Bosque	Se observó que en el sitio entraba una gran cantidad de luz. En la finca no se ha realizado ningún tipo de manejo de bosque.	No
22	Testigo	Bosque	Sitio con una pendiente aproximadamente de 40%.	No
23	Degradación	Bosque	Se observó un claro de aproximadamente 20 m ² . En la finca no se ha realizado ningún tipo de manejo de bosque.	No
24	Testigo	Bosque	Sitio con un porcentaje de pendiente del 2%. En la finca no se ha realizado ningún tipo de manejo de bosque.	No
25	Degradación	Bosque	Sitio que colindaba con un tacotal. En la finca no se ha realizado ningún tipo de manejo de bosque.	No
26	Testigo	Bosque	Sitio que colindaba con una quebrada. En la finca no se ha realizado ningún tipo de manejo de bosque.	No

Deforestación.

Se visitaron los sitios deforestados que señaló CLASlite en las fincas seleccionadas, sin embargo de 6 sitios visitados se evidenció un error del 66,67% (cuadro 4). Dentro de los errores presentes en los sitios deforestados se encontraron 2 sitios que no se presentaron dentro de una cobertura boscosa. Por ejemplo el sitio A desde antes del periodo 2014-2015 era un pasto arbolado de aproximadamente 2 hectáreas y el sitio B una plantación de *Gmelina arborea* de aproximadamente 7 años (Figura 6).

Cuadro 4. Porcentaje de error para los sitios deforestados señalados por CLASlite.

Claslite	Sitios no deforestados	Sitios deforestados	Total
Sí	4	2	6
%	66,67	33,33	100,00

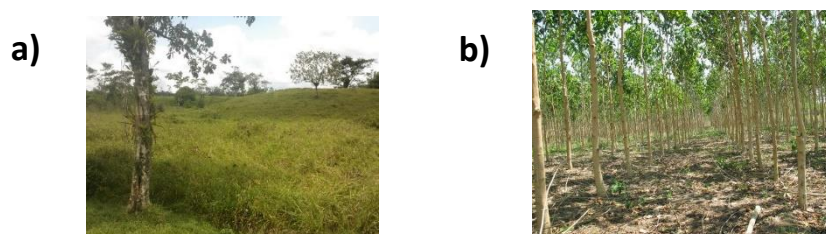


Figura 6. Sitio A: Pasto arbolado y Sitio B: Plantación de *Gmelina arborea*.

Existieron dos sitios donde sí se presentó deforestación de forma natural, ya que se observaron árboles caídos por efecto del viento, rayos o muerte de los mismos, y no se evidenció la presencia de algún tipo de aprovechamiento forestal (Figura 7).



Figura 7. Sitios C y D: Deforestación natural en bosque.

Para efectos de CLASlite el término deforestación se define como un proceso provocado por la acción humana que por consecuencia origina un cambio en el uso del suelo, por lo que de acuerdo a los datos obtenidos, la caída de árboles se presentó de forma natural y no existió

cambio en el uso del suelo, se concluye que ambas observaciones se catalogan como degradación natural del ecosistema.

La degradación forestal puede ser originada por actividades como por ejemplo: la sobreexplotación de productos maderables y no maderables, invasión del bosque (ocupación ilegal), sobrepastoreo, desarrollo no planificado de infraestructura, incendios forestales y plagas y enfermedades.

El manejo forestal se considera como una actividad que no conduce a la degradación de los ecosistemas, sin embargo para efectos de este estudio no se evidenció de forma estadística.

Degradación.

Área basal. El cuadro 5 muestra los valores de área basal recolectados en las diferentes parcelas, esto en: sitios testigos y parcelas de degradación según CLASlite.

Cuadro 5. Datos de área basal de las parcelas testigo y de degradación montadas en los diferentes sitios de muestreo.

Pares	Testigo (m²/ha)	Degradación (m²/ha)
1	30,9	12,3
2	25,9	22,1
3	27,1	24,9
4	57,9	31,2
5	10,1	3,5

Se puede apreciar que las parcelas testigo presentan valores de área basal mayores que las que se muestran en las parcelas de degradación según CLASlite.

El cuadro 6 muestra los resultados obtenidos de la prueba T para medias apareadas en donde se evidencia que existe diferencias significativas en los valores de área basal de las parcelas degradadas respecto a las parcelas testigo a un valor de probabilidad de 0,07 para dos colas.

Cuadro 6. Prueba T para la variable área basal por hectárea.

	<i>Testigo (m²/ha)</i>	<i>Degradación (m²/ha)</i>
Media	30,4	18,8
Varianza	300,2	119,1
Observaciones	5,0	5,0
Coefficiente de correlación de Pearson	0,81	
Diferencia hipotética de las medias	0,00	
Grados de libertad	4,00	
Estadístico t	2,44	
P(T<=t) una cola	0,04	
Valor crítico de t (una cola)	2,13	
P(T<=t) dos colas	0,07	
Valor crítico de t (dos colas)	2,78	

El valor promedio obtenido de las parcelas testigo se compara con los valores obtenidos por Louman et al (2001) quienes indican que los bosques no intervenidos en Costa Rica presentan valores de área basal entre los 24 y 32 m² ha⁻¹.

Los valores medios de área basal obtenidos para los sitios degradados se ajustan a los mencionados por Tenorio-Monge, Solano-Durán, & Castillo-Ugalde (2012) para bosques intervenidos ubicados en zonas de vida bosque húmedo tropical y bosque muy húmedo, donde el valor promedio es de 23,20 m²ha⁻¹.

La razón de las diferencias entre los sitios degradados y no degradados se debió a los impactos producidos por actividades como el aprovechamiento forestal que se aplicó en algún momento en los sitios de muestreo, diversos autores como Congdon y Herbohn (1993), Reiners et al., (1994) & Hall et al., (2003) mencionan que en sitios degradados actividades como la continua extracción de especies arbóreas de diámetros y alturas de interés reducirá el área basal de esos sitios.

Biomasa aérea.

El cuadro 7 muestra que los valores de la variable biomasa aérea presentan diferencias notables en los valores obtenidos entre las parcelas testigo y las degradadas.

Cuadro 7. Datos de biomasa de las parcelas testigo y de degradación montadas en los diferentes sitios de muestreo.

Pares	Testigo (Kg/ha)	Degradación (Kg/ha)
1	242199	109999
2	262443	206207
3	295428	232755
4	620626	365024
5	77658	18341

La prueba estadística evidencia las diferencias que existen entre los valores promedio de los sitios testigo respecto a los sitios degradados a una significancia de 0,04 (cuadro 8).

Cuadro 8. Prueba T para la variable biomasa por hectárea.

	Testigo (Kg/ha)	Degradación (Kg/ha)
Media	299670,7	186465,4
Varianza	39252136918,9	17132109734,9
Observaciones	5,0	5,0
Coefficiente de correlación de Pearson	0,95	
Diferencia hipotética de las medias	0,00	
Grados de libertad	4,00	
Estadístico t	2,96	
P(T<=t) una cola	0,02	
Valor crítico de t (una cola)	2,13	
P(T<=t) dos colas	0,04	
Valor crítico de t (dos colas)	2,78	

El valor promedio obtenido de las parcelas testigo es similar al valor mencionado por Ulate-Quesada (2011) para bosques no intervenidos. Sin embargo Schlegel (2001) menciona que los bosques siempre verdes presentan valores de 193270 a los 662020 kg ha⁻¹, y que la variación de la biomasa aérea va a depender del grado de desarrollo y grado de intervención del bosque.

Porcentaje de luminosidad.

El cuadro 9 señala los porcentajes de luminosidad presentes en los sitios testigos y los sitios degradados. Se deduce que los sitios degradados son los que presentan los mayores porcentajes de luminosidad en cada uno de los sitios muestreados.

Cuadro 9. Datos de luminosidad de las parcelas testigo y de degradación montadas en los diferentes sitios de muestreo.

Pares	Testigo (%)	Degradación (%)
1	8,58	11,44
2	7,93	11,96
3	9,62	10,40
4	9,10	11,70
5	8,84	57,98

Para el caso de las parcelas número 5 se observa una diferencia entre el sitio degradado y el testigo del 49,14%, este dato se vio influenciado por su colindancia con una cobertura agrícola.

Cuadro 10. Prueba de normalidad Shapiro- Wilk para el porcentaje de luminosidad.

	Testigo (%)	Degradación (%)
N	6	6
Shapiro-Wilk W	0,6551	0,726
P (normal)	0,002011	0,01149

El cuadro 10 muestra la prueba de normalidad aplicada al conjunto de datos de luminosidad, la prueba demostró que estos datos no siguen una distribución normal por lo que fue necesario la aplicación de una prueba estadística no paramétrica, en este estudio se aplicó la prueba de Wilcoxon para valores apareados.

Cuadro 11. Prueba Wilcoxon para el porcentaje de luminosidad.

Wilcoxon test			
W :	21		
Normal appr. z :	2,2014	p (same median):	0,027708
Monte Carlo (n=99999):	p (same median):		0,03069
Exact:	p (same median):		0,03125

La prueba estadística Wilcoxon evidencia diferencias significativas entre los sitios testigo y los sitios degradados a un valor de significancia del 0,03. Se presenta un valor medio de 8,81% para los sitios testigos y un valor promedio del 20,70% para el caso de los sitios degradados.

De acuerdo a los datos obtenidos en investigaciones de FUNDECOR (Morales, 2015) para el caso de bosques sin ningún tipo de intervención se obtuvo un promedio de luminosidad del 6,7%, el cual es similar al obtenido en este estudio en las parcelas testigo.

Dentro de la dinámica del bosque se presenta la caída de un árbol o ramas, lo que produce una apertura en el dosel superior ya sea de forma natural o por el aprovechamiento forestal, lo que permite el aumento de la penetración de luz en el piso del bosque, por lo tanto Springett, Wetzell, Ceroni Stuva, Domínguez Torrejón & Castillo Quiliano (2013) mencionan que dentro de los bosques tropicales, la cantidad de luz que penetra en la vegetación y que llega al suelo varía tanto por la densidad como por la posición de las hojas.

En un bosque lluvioso tropical denso, por lo general, solo entre un 0,25% y un 2% de la luz que llega al dosel superior, atraviesa por completo la densa vegetación. En áreas de bosque más abierto, es decir bosques intervenidos por ejemplo, la luz puede filtrarse más fácilmente.

Contabilización de errores. Se hizo la contabilización de errores, ya que existieron 4 sitios en que el programa CLASlite los señaló como sitios degradados, sin embargo no se pudieron establecer parcelas porque los sitios no contaban con ningún tipo de cobertura boscosa, sino que se ubicaron dentro de coberturas como plantaciones y pastos (cuadro 3 y 12).

Cuadro 12. Porcentaje de error para los sitios degradados señalados por CLASlite.

Claslite	Sitios no degradados	Sitios degradados	Total
SÍ	4	6	10
%	40	60	100

Por lo descrito anteriormente se puede determinar que CLASlite detectó diferencias entre los sitios degradados en comparación a los sitios testigo, esto se evidencia además por medio de los resultados generados por las variables medidas en campo: área basal, biomasa y porcentaje de luminosidad.

CLASlite presentó errores en diferentes sitios ya que los identificaba como una cobertura boscosa pero la validación de campo comprobó que eran coberturas como pastos y plantaciones. El error del programa CLASlite se debió a diferentes causas, como por ejemplo que las imágenes utilizadas presentaban un porcentaje de nubosidad mayor al 40%, lo que ocasionó que cuando se realizó el análisis visual de las coberturas se indicaran diferentes grupos de pixeles de deforestación y degradación como falsos positivos.

Cuando se detectó el cambio en la cobertura se utilizó el umbral pre-definido por CLASlite (Bosque: $PV \geq 80$ y $S < 20$ - Área no boscosa: $PV < 80$ y $S > 20$), sin embargo Cabrera et al., (2011) mencionan que este umbral no es muy preciso para detectar las coberturas boscosas de Costa Rica dado que este umbral fue creado para estudios de vegetación en la Amazonia, es decir para grandes extensiones y no para el caso de extensiones pequeñas como se aprecia en los bosques de Costa Rica. Hansen, Townshend, DeFries & Carroll (2005) concluye que esta causa puede conllevar a posibles errores en los cálculos de detección.

Otra causa es el uso de imágenes Landsat para este tipo de estudios, ya que en el presente estudio se tenían pequeñas extensiones de bosque por lo que este tipo de imágenes no necesariamente reflejan las coberturas con un gran nivel de detalle y para este tipo de estudios se requiere (García, Huamani & Cubas, 2012).

Conclusiones

Los sitios clasificados por CLASlite como degradados presentan menor área basal y biomasa aérea, pero mayor porcentaje de luminosidad en comparación a los sitios testigo.

CLASlite es una alternativa para el monitoreo de la degradación forestal, ya que en un 60% de las predicciones indicadas fueron correctas y se pudo determinar en el campo que esos sitios detectados fueron alterados o al menos intervenidos con anterioridad a través del manejo forestal.

Se cree que el manejo de bosque no es una actividad que conduzca a la degradación de los ecosistemas, sin embargo para efectos de este estudio no se evidencia de forma estadística, por lo que sería interesante realizar un estudio más a fondo sobre el tema que pueda evidenciar estos resultados.

En el caso de deforestación, la validación de campo evidenció un error de un 66,67% del total de los sitios visitados, por lo que se concluye que no es recomendable para el monitoreo de sitios deforestados, al menos que se hagan las variaciones pertinentes tales como: hacer una modificación del umbral pre-definido por CLASlite y hacer uso de imágenes de otro satélite

Realizar estimaciones de la deforestación permite tener un escenario de referencia para inferir los contenidos de carbono que eventualmente podrían jugar un papel importante en la toma de decisiones para destinar áreas de conservación, inclusión de coberturas boscosas en los mercados de carbono y la generación e implementación de la estrategia REDD+.

Recomendaciones

Al utilizar imágenes Landsat con un porcentaje de nubosidad mayor al 40% se afectó la interpretación de las coberturas por lo que se recomienda utilizar otro satélite como por ejemplo SPOT.

Se recomienda hacer una adaptación del umbral utilizado por CLASlite en el árbol de decisión, y que este sea específico para Costa Rica, para así mejorar los resultados a la hora de separar la categoría de bosque y no bosque. Por ejemplo se recomienda aumentar los valores pre-establecidos en el umbral pre-definido por CLASlite para que se pueda diferenciar entre las coberturas de bosque y no bosque.

Sería interesante hacer una comparación entre los resultados que generan otros programas semejantes que se encuentren dentro del marco de la estrategia REDD+ como por ejemplo: PRODES, FSI y FRARSS-TREES 3, y así poder comprobar cuál de estos presenta mejores resultados.

Referencias

Aguilar, C., Martínez, E., & Arriaga, L. (2000). Deforestación y fragmentación de ecosistemas. Qué tan grave es el problema en México, 7-11.

Angulo, C. E. P., Suárez, I. A., & López, J. (2013). Comparación de los métodos utilizados en el monitoreo de la deforestación tropical, para la implementación de estrategias REDD+, caso de estudio los Llanos Occidentales Venezolanos.

Asner, G., Páez, G., Knapp, D., Balaji, A., & Clark, J. (2009). Sistema Amigable de Monitoreo de la Deforestación y Perturbación de Bosques Tropicales CLASlite. Guía del usuario, versión 2.0. Departamento de Ecología Global. Institución Carnegie para la Ciencia. 260 Panamá Street.

Asner, G., Tasar, E., Sousan, S., & Knapp, D. (2013). Claslite: Tecnología para el monitoreo de bosques. Guía del usuario versión 3.2. Unpublished manuscript.

Bertsch, F. Mata, R. Henríquez, C. (1993). Características de los principales ordenes de suelos presentes en Costa Rica. IX Congreso Nacional Agropecuario y de Recursos Naturales. Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Bolaños, R.; Watson, V., y Tosi, J. 2005. Mapa ecológico de Costa Rica (Zonas de Vida), según el sistema de clasificación de zonas de vida del mundo de L.R. Holdridge), Escala 1:750 000. Centro Científico Tropical, San José, Costa Rica.

Cabello, J., & Paruelo, J. M. (2008). La teledetección en estudios ecológicos. Revista Ecosistemas, 17(3).

Cabrera, E., Vargas, D. M., Galindo, G., García, M. C., Ordoñez, M. F., Vergara, L. K.,... & Giraldo, P. (2011). Memoria técnica de la cuantificación de la deforestación histórica nacional—escalas gruesa y fina. Bogotá DC: IDEAM-Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 106.

Chave, J., Réjou- Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B.,... & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology*, 20(10), 3177-3190.

Congdon, R. y J. Herbohn. 1993. Ecosystem dynamics of disturbed and undisturbed sites in north Queensland wet tropical rain forest. I. Floristic composition, climatic and soil chemistry. *J. Trop. Ecol.* 9: 349-363.

Fadda, J. (2009). Clasificación de suelos. Cátedra de Edafología. Facultad de Agronomía y Zootecnia. Universidad Nacional de Tucumán. Recuperado de: <http://www.edafologia.com.ar>

- García, D., Huamani, G., Cubas, C. (2012). Modelamiento y análisis temporal de la deforestación en la selva central del Perú utilizando imágenes satelitales.
- Grainger, A. (Ed.). (2013). Controlling Tropical Deforestation. Routledge.
- Hall, S. J., J. D Harris, V. Medjibe y P. M. S. Ashton. 2003. The effects of selective logging on forest structure and tree species composition in a Central African Forest: implications for managements of conservation areas. *Forest Ecol. Manag.* 183: 249-264.
- Hansen, M. C., Townshend, J. R., DeFries, R. S., & Carroll, M. (2005). Estimation of tree cover using MODIS data at global, continental and regional/local scales. *International Journal of Remote Sensing*, 26(19), 4359-4380.
- Hirata Y, Takao G, Sato T, Toriyama J (eds) (2012). Libro de Recetas de la REDD-plus. Centro de Investigación y Desarrollo REDD, Instituto de Investigación en Forestería y Productos Forestales, Japón, 156pp. ISBN 978-4-905304-15-9
- Informe, I.P.C.C. (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Lipper, L. (2000). Degradación Forestal y Seguridad Alimentaria. Obtenido de <http://www.biblioteca.org.ar/libros/88769.pdf>.
- Louman, B; Quirós, D; Nilson, M. 2001. Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central. Cartago, CR, CATIE. 265 p.
- Morales, A. (2015). Porcentajes de luminosidad en trampas de escarabajos. Fundación para el Desarrollo de la Cordillera Volcánica Central (FUNDECOR). Documento no publicado.
- Ortiz, E.1997 Refinement and evaluation of two methods to estimate aboveground tree biomass in tropical forest. Tesis para el grado de Doctor of Philosophy. New York, USA; State University of New York. p116.
- Reiners, A. W., F. A. Bouwman, J. W. F. Parsons y M. Keller. 1994. Tropical rain forest conversion to pasture: changes in vegetation and soil properties. *Ecol. Appl.* 4(2): 363-377.
- Reyes, G., Brown, S., Chapman, J., & Lugo, A. E. (1992). Wood densities of tropical tree species.

Schlegel, B. (2001). Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. In Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales (Vol. 18).

Springett, C., Wetzell, A., Ceroni Stuva, A., Domínguez Torrejón, G., & Castillo Quiliano, A. (2013). Respuesta de la regeneración natural de la *Uncaria tomentosa* (Willd) DC" Uña de gato", al efecto de la luz en ecosistemas boscosos primarios intervenidos dentro del Bosque Nacional Alexander Von Humboldt, Pucallpa-Perú. *Ecología Aplicada*, 12(2), 99-109.

TEC (Tecnológico de Costa Rica). (2014). Atlas Digital de Costa Rica 2014. Cartago, Costa Rica.

Tenorio-Monge, C., Solano-Durán, J., & Castillo-Ugalde, M. (2012). Evaluación de la composición florística y estructural en un bosque primario intervenido en la zona norte de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 6(16), 52-62.

Ugalde, A., & Luis, A. (1981). Conceptos básicos de dasometría.

Ulate Quesada, C. A. (2011). Análisis y comparación de la biomasa aérea de la cobertura forestal según zona de vida y tipo de bosque para Costa Rica (Doctoral dissertation, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Forestal).

Zanne, A., Lopez-Gonzalez, G., Coomes, D., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S, Chave, J. (2009). Global wood density database. Dryad. Identifier: http://hdl.handle.net/10255/dryad_235.