

UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR
ESCUELA DE CIENCIAS GEOGRÁFICAS

PROGRAMA PARA LA PROMOCIÓN DE LA GESTIÓN Y EL ORDENAMIENTO DEL TERRITORIO.
(PROGOT)

Informe Parcial I:

Proyecto:
Clima urbano y variabilidad climática en la planificación urbana. Estudio de caso en los centros urbanos de Alajuela y Heredia, Costa Rica.

Responsable de proyecto

Geógrafo Omar E. Barrantes Sotela

Diciembre 2016

Índice general

Introducción	5
Presentación	5
Justificación	5
Objetivos	6
Marco teórico general	7
Metodología General	9
Productos esperados	12
Componente climático	13
Línea climática base (1961 - 1990)	13
Estaciones Climáticas	14
El uso urbano	17
Albedo de la superficie terrestre	20
Transformación Tasseled Cap (Kauth-Thomas) y valores de sesgo	24
Resultados del TCT	27
Índice de disturbio (disturbance index)	33
Anexo: Cálculos y gráficos complementarios	46

Introducción

Presentación

Las ciudades en las regiones tropicales se expanden rápidamente y son objeto de impacto y consecuencias climáticas negativas, como la alteración de su microclima (calentamiento). Este proyecto busca analizar la interacción entre los tipos de coberturas urbanas, las condiciones atmosféricas, y la temperatura superficial; parámetros esenciales y necesarios en los estudios de climatología urbana y variabilidad climática (Watson 2012). Para ello se enfocará en describir los patrones de climáticos de variabilidad y su correlación con las coberturas y uso de la tierra, tanto a escala regional y local.

Con el fin de establecer unos lineamientos básicos sobre el tema climático en función del ordenamiento del territorio. Se pretende la elaboración de cartografía temática específica, así como la presentación de resultados pertinentes, para que puedan ser incorporados en la reglamentación o normativa territorial, de una manera fácil y comprensible por las diferentes entidades o instituciones competentes. Lo anterior, con el propósito de generar conciencia y una reacción a los problemas, que se pueden originar del nuevo contexto climático en las áreas urbanas, mediante el establecimiento de estrategias de adaptación a la variabilidad y cambio climático.

Justificación

En este proyecto se pretende establecer la relación del fenómeno de variabilidad climática en función del cambio de las coberturas y uso de la tierra en la Gran Área Metropolitana como región de análisis y a nivel local para los distritos centrales de Alajuela y Heredia, en un periodo de 35 o 40 años. Partiendo de que las modificaciones realizadas por el ser humano al medio natural, y como estas de forma indirecta o directa han alterado la composición atmosférica, provocando variaciones en la precipitación y temperatura a nivel mundial, regional y local; la cual se suma a la variabilidad natural del clima observada en periodos determinados de tiempo (CEPALFORJA 2012).

Dado las condiciones anteriores a nivel nacional una de las principales

críticas a las propuestas de ordenamiento del territorio tanto a nivel regional como local, es la carencia del análisis de la variabilidad climática y su impacto en las actividades humanas, que usualmente se aborda de manera general describiendo las condiciones climáticas de un año en específico sin considerar las variaciones de los datos en periodos mayores de 30 años y su comportamiento en intervalos cortos de tiempo, que permitan verificar la existencia o no de una variabilidad en los patrones de las condiciones atmosféricas. El abordaje de esta variable física en los procesos planificación territorial solo es mencionado en el diagnóstico y en la mayoría de los casos este componente no se refleja en las estrategias o lineamientos en los usos propuestos de zonificación o en los reglamentos de los planes de ordenamiento territorial.

La integración de las acciones humanas y su relación con la variabilidad climática, se visualiza como un acercamiento estratégico desde el punto de vista territorial, donde se desarrollen las actividades desde una concepción de sostenibilidad al reducir el impacto del desarrollo humano sobre el ambiente y los recursos naturales. La estimación a futuro asociado al cambio o la variabilidad climática sobre el medio urbano, de acuerdo a (Ezquiaga Domínguez 2010) se apoya en una creciente precisión de las previsiones climáticas, donde se integran los factores naturales e incidencia de las actividades humanas, asociadas a parámetros como el aumento de la temperatura, disminución de la precipitación y posible impacto por islas de calor en centros urbanos con aglomeraciones significativas de población.

En esta propuesta la Escuela de Ciencias Geográficas por su orientación en ordenamiento territorial y el estudio los procesos espaciales que ocurren en un territorio, busca estudiar el componente de variabilidad climática e incorporarlo como un parámetro fundamental en la planificación territorial y urbana.

Por motivos operacionales y presupuestarios, se establece el alcance de este proyecto solo a la Gran Área Metropolitana (análisis regional) y a nivel local en las aglomeraciones urbanas centrales de Alajuela y Heredia. Lo que en un futuro y de tener éxito en esta iniciativa se replicaría a otras áreas urbanas de Costa Rica. La selección de esta área, también responde, a la existencia de información base necesaria para valoraciones climáticas y evaluación de usos de la tierra para los diferentes periodos escogidos.

Objetivos

Objetivo general

1. Relacionar la variabilidad climática en función del cambio de las coberturas y uso de la tierra, en las áreas urbanas de la Gran Área Metropolitana, en el período de 1975 - 2015.

Objetivos específicos

1. Determinar el patrón de variabilidad climática, a nivel regional en la GAM, en el período de estudio.
2. Calcular la tasa de cambio de uso de la tierra para dos períodos temporales, a una escala regional (1:100 000) GAM y local en las aglomeraciones urbanas centrales de Alajuela y Heredia (1:25 000), como casos de estudio.
3. Analizar la correlación de la variabilidad climática con la tasa o índice de cambio de uso de la tierra, en las áreas con predominio urbano, a nivel regional y local de la GAM.
4. Proponer lineamientos básicos de consideración climática para la planificación urbana.

Marco teórico general

El concepto de variabilidad climática, tiene una estricta relación con las variables físicas como temperatura, radiación solar, humedad, presión atmosférica y precipitación. Para establecer si se presenta una variabilidad en estas condiciones del clima se considera el registro de datos de al menos 30 años. La variabilidad climática ocurre cuando el rango de los elementos climáticos, mencionados anteriormente, varía estadísticamente de un año a otro. Incluso puede incluir las variaciones en la actividad de condiciones extremas, como las variaciones del número de aguaceros (chubascos de corta duración) de un verano a otro, fenómeno que varía tanto a nivel local como regional, tal como lo menciona (Ministerio del Ambiente Ecuador 2015) al establecer que la variabilidad climática es mayor a nivel regional o local que al nivel hemisférico o global. Condiciones que podrían provocar un aumento en la temperatura en lugares como América Central, una región tropical con condiciones generalmente calurosas y húmedas (UNA 2013).

Si bien el comportamiento en las variables atmosféricas tanto a nivel oceánico como terrestre, presenta variaciones año con año, la variación es significativa si se presentan valores extremos en periodos cortos, lo que indicaría una variabilidad climática. Generalmente es aceptado que las variaciones climáticas ocurren debido a los eventos de El Niño Oscilación del Sur, como un fenómeno de escala planetaria, y consecuentemente es la causa principal de la variabilidad climática observada en distintas regiones del mundo.

En otro sentido, el proceso de urbanización puede introducir variaciones climáticas, al ser un caso extremo en el cual las actividades humanas alteran las características del uso local natural, así como de las áreas cercanas o continuas, que pueden provocar alteraciones significativas entre la superficie terrestre y la atmosfera, y por consiguiente afectar desde los procesos atmosféricos locales hasta escalas climáticas globales y sinópticas (Loridan

y Grimmond 2012). Las áreas urbanas son generalmente más cálidas que las áreas naturales, debido a que sus superficies reducen la evapotranspiración y presentan diferencias en las capacidades térmicas, conductividad termal, albedos y emisividad para potenciar el calentamiento urbano (Jacobson y Ten Hoeve 2012), en especial con la presencia del fenómeno de las Islas de Calor Urbano.

En Latinoamérica las aglomeraciones urbanas, han tomado un gran interés en el estudio climático urbano asociado al tema de ordenamiento territorial, especialmente al considerar que el proceso de Urbanización, no es simplemente la concentración demográfica en ciudades o aglomeraciones urbanas; es además un proceso que promueve la expansión de las necesidades de consumo. Por consiguiente las tres facultades principales de la propiedad: uso (*ius utendi*), goce (*ius fruendi*) y disfrute (*ius abutendi*); están sujetas a la dinámica de consumo y de producción. Es así como, los patrones de usos de la tierra se estructuran potencialmente según aquellos espacios geográficos que presentan las mejores condiciones de soporte de una actividad dada.

En el caso de Costa Rica, (M. González y Saenz 1996) señalan, que el crecimiento de las centralidades no tiene una base de un ordenamiento urbano lógico, acorde a sus necesidades y actividades. En consecuencia se considera un crecimiento acelerado, que principalmente ocurre a expensas del sector rural o de las áreas de protección agrícola especial de la Gran Área Metropolitana, que se estimula en gran medida por la apertura de caminos cantonales, que sustentan una continuidad urbana que necesita de la creación de servicios, viviendas, fuentes de empleo, así como de infraestructura e inmobiliario urbano.

A medida que ocurre el crecimiento (paulatino o acelerado) de un área urbana, factores como el calor producido por el efecto de la antropización y la contaminación atmosférica, contribuyen a la formación de un clima distinto e introduce una variación al estado natural (Arce y Acevedo 2014). En la mayoría de los casos, diversos autores reportan una máxima variación en las centralidades y una atenuación de los efectos de variabilidad en la periferia. Una de las causas más evidentes, es la pérdida de la cobertura vegetal del suelo. Por lo cual asociar espacialmente el índice o tasa de cambio del uso de la tierra con las variaciones climáticas anuales, permitiría identificar los aportes, ya sea en términos de ganancia o pérdidas en el ecosistema urbano de auto regular su microclima.

Por lo tanto, un mejor entendimiento de las interacciones de escala local entre las típicas unidades urbanas y la atmósfera es necesaria tanto en el ordenamiento territorial y la propuesta de estrategias de mitigación del cambio o variabilidad climática.

Metodología General

Área de estudio

Esta investigación presenta dos ámbitos espaciales a desarrollar, la escala regional y local. En la escala regional del estudio abarca el sector oeste del Gran Área Metropolitana de Costa Rica, según la delimitación del INVU en el Plan GAM de 1982 (Mora-Ramírez 2006).

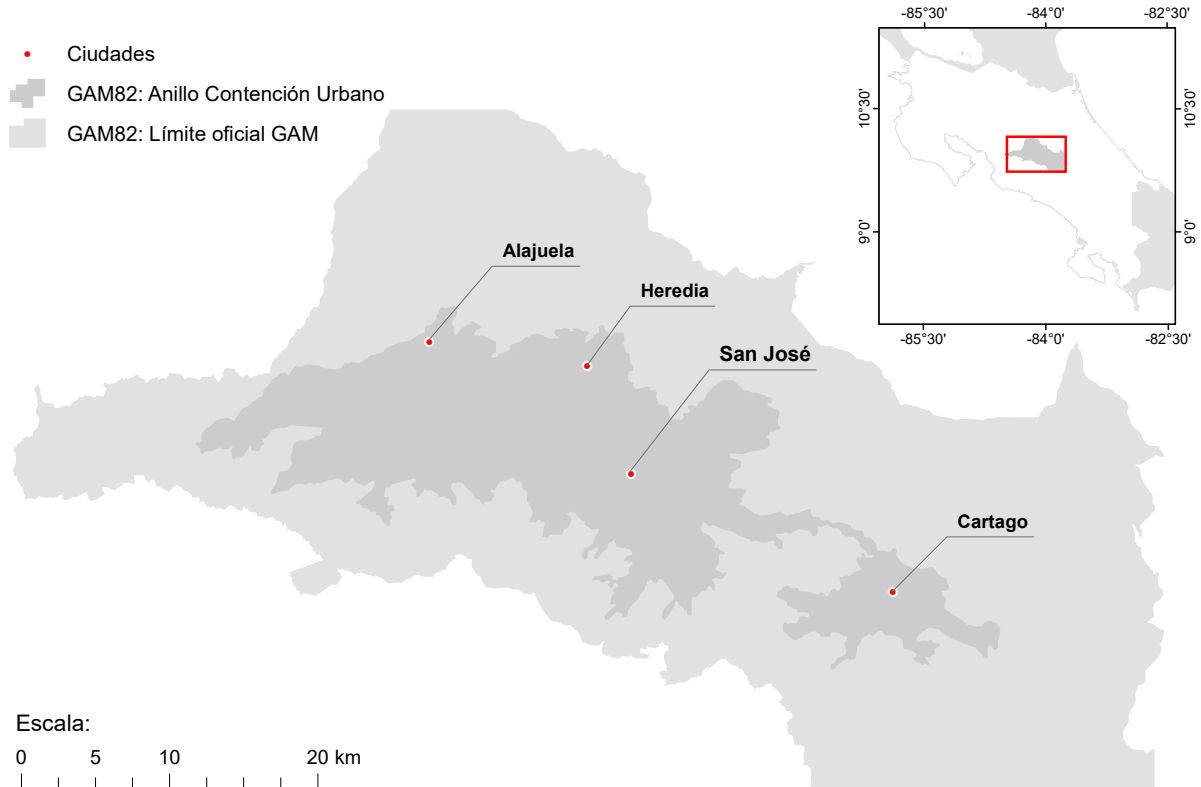


Figura 1: Área de estudio (Escala Regional).

A escala local, se estudiarán las centralidades urbanas de Alajuela y Heredia. Según el (INEC 2016), se proyecta una población para el año 2016 de 47.255 y 19.218 personas respectivamente. Además presentan una gran especialidad funcional urbana por la cantidad de servicios y comercios disponibles para sus habitantes. En las áreas centrales se encuentran estructuras de 2 pisos y en algunos casos particulares ascienden a tres y cuatro niveles.

Una de las principales razones, por las cuales se establecen escalas regional y local para esta investigación, es debido a que se intenta establecer como los valores que toman los parámetros para estudiar la variabilidad climática urbana pueden cambiar de una manera significativa en función de su patrón de distribución espacial. Esto permitirá ajustar modelos climáticos e hidrológicos, los cuales son de suma importancia para la toma de decisiones a nivel



Figura 2: Área de estudio (Escala Local).

regional y local.

Componente Variabilidad climática

Se sistematizan los registros de precipitación y temperatura de las estaciones fijas dentro o cercanas al área de estudio. Se normalizan o ajustan los datos en relación con el efecto anual que puede provocar el ENOS respecto del valor medio de cada serie climática. Para este análisis se considera como año ENOS aquella serie que presente temperaturas superficiales del mar (TSM) en la Región Niño 3 (entre los 5°N y 5°S, 150°O y 90°O del Océano Pacífico) superiores a 0.5°C de su valor normal y que se mantengan en, o sobre este valor, por lo menos durante 6 meses en forma consecutiva. Según la serie histórica de TSM desde 1969 a 1997, los años ENOS han sido 1969, 1972, 1976, 1977, 1982, 1983, 1986, 1987, 1991, 1992, 1993, 1994, 1997, 1998, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2009, 2010, 2014, 2015.

Se realizará un análisis de varianza para determinar diferencias estadísticas. Los promedios serán analizados por el método de Duncan o Newman-Keuls para separación de medias.

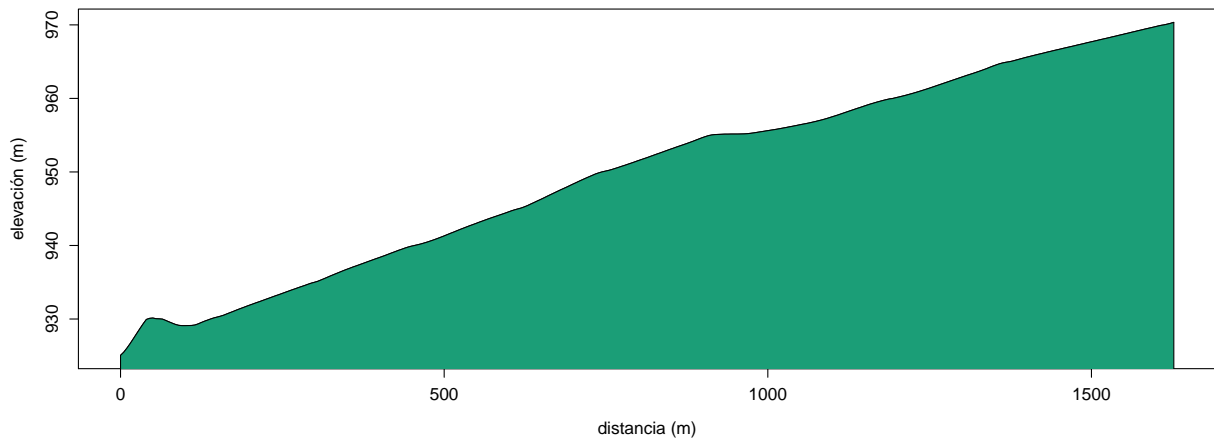


Figura 3: Alajuela: Perfil topográfico.

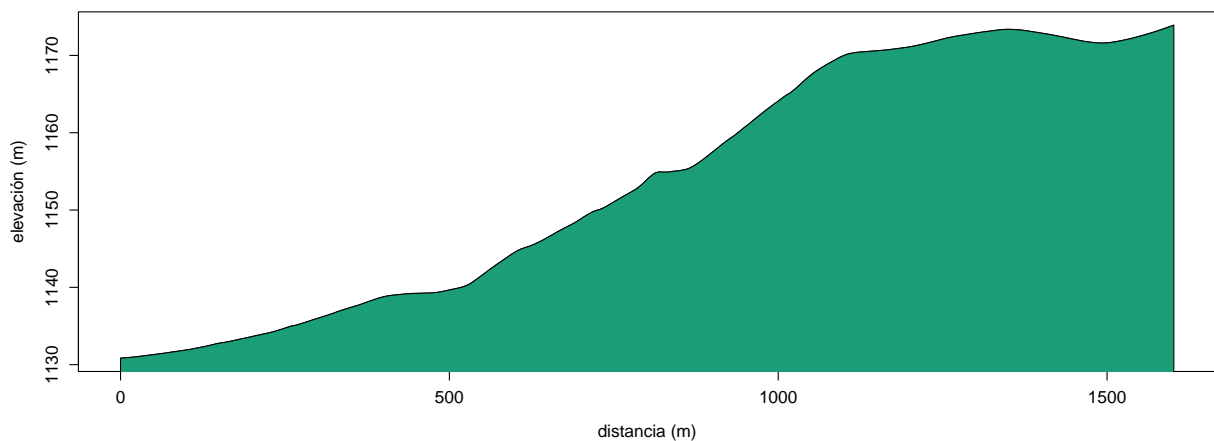


Figura 4: Heredia: Perfil topográfico.

Componente espacial

Este componente se orienta al desarrollo del segundo objetivo, que busca elaborar una cobertura de uso de la tierra en las áreas de estudio, por lo cual se efectuarán labores de recopilación de material fotogramétrico histórico y reciente, levantamiento de información en el terreno, procesamiento de los datos y verificación de resultados. Es en esta etapa en la cual se realiza la valoración de las características detalladas de los usos de la tierra. Para el modelaje de cambios de uso de la tierra se utilizará método estadístico de las cadenas de Markov, que consiste en establecer la probabilidad de cambio de uso de una cobertura que mantenga o cambie a otra cobertura en el tiempo, a partir de un proceso estocástico, el cual es un proceso aleatorio que evoluciona de acuerdo a un parámetro que por lo general es el tiempo. La variable aleatoria t_X que describe el proceso, está indexada por el parámetro t ó índice del proceso. Por lo tanto un proceso estocástico es una colección de variables

aleatorias definidas sobre un mismo espacio muestral o espacios de estados.

Componente correlación espacial datos climáticos e índices de cambio de uso de la tierra

Se procederá a realizar una matriz de valoración Delphi para lograr la consecución de un consenso basado en la discusión entre expertos, de los datos obtenidos de los análisis del proyecto, para la definición de lineamientos básicos climáticos, con el fin de ser tomados en cuenta en los procesos de planificación y ordenamiento del territorio.

Productos esperados

1. Elaboración de al menos un artículo científico (con sello editorial).
2. Atlas temático (versión digital) de cambio de uso de la tierra en el período de estudio.
3. Elaboración de diagramas, posters y gráficos informativos.
4. Geobase de datos con la información generada en el proyecto y que será colocada en una plataforma de visualización espacial, vinculada al programa PROGOT de la ECG-UNA.
5. Participación de estudiantes de pregrado y grado, así como trabajos finales de graduación.
6. Establecimiento de lineamientos generales para la inserción del análisis climático en las propuestas de ordenamiento del territorio.

Componente climático

Línea climática base (1961 - 1990)

Según el (Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH) 2008), la región Central es parte de la Unidad Estructural Volcánica y la Franja de Tilarán. En esta región se enfoca en el Valle Central Occidental correspondiente a la depresión del río Grande de Tárcos. Está es afectada por condiciones del Pacífico (Zona de Convergencia Intertropical y vientos ecuatoriales), así como por la influencia del Caribe¹. En los sectores bajos del valle occidental (Atenas, Turrúcares, La garita, Guácima), predomina un clima seco con marcada influencia del Pacífico. En los sectores medios del Valle Occidental (San José y Heredia), se define un clima templado. El Valle Occidental es más lluvioso (2300 mm) especialmente en el período comprendido entre los meses de setiembre y noviembre, con mayor influencia del Pacífico, mientras que la temperatura promedio es de 21,9° C y las temperaturas máximas se alcanzan en los meses de abril y mayo con una mayor variación interanual.

PALABRAS CLAVE:

- **Variabilidad climática** - Es la manera en la que el clima fluctúa anualmente arriba o por debajo del valor promedio a largo plazo.
- **Cambio climático** - Cambio continuo a largo plazo (incremento o decremento) del promedio de las condiciones del tiempo o de un rango del tiempo.
- **Normalidad climática** - Promedio de 30 años de la variable climática.

¹ Vientos Alisios del noroeste, con derrame de nubosidad y lluvias débiles que arriban al Valle por medio de los pasos entre montañas.

Estaciones Climáticas

Se indican las estaciones meteorológicas ha utilizar en la generación de la línea climática básica. Normalización y cálculo se encuentra pendiente o en proceso.

Número Estación	Nombre Estación
84074	AEROP. PAVAS
69512	ZARCERO(A.E.A.)
69511	LOS ENSAYOS
73018	LINDA VISTA
84059	LA LUISA
73081	VOLCAN IRAZU
84016	NARANJO
84003	LA ARGENTINA
84005	AVANCE
84011	LORNESSA
73022	PACAYAS
84021	A. J. SANTAMARIA
84024	HDA OJO DE AGUA
84019	HDA LA LAGUNA
84056	VILLA COLON
84046	S. JOSECITO (HEREDIA)
73091	HDA EL CARMEN
73003	COMANDANCIA (CARTAGO)
84012	TURRUCARES
84014	PALMARES
84006	HDA CONCEPCION
84022	DESAMPARADOS

Tabla 1: GAM: Estaciones meteorológicas

Instrumentalización

Revisar http://rainwise.com/products/detail.php?ID=6802&Category=MK-III-LR__Long_Range_Stations__:Sensor_Assemblies&pageNum_cart=/products/index.php

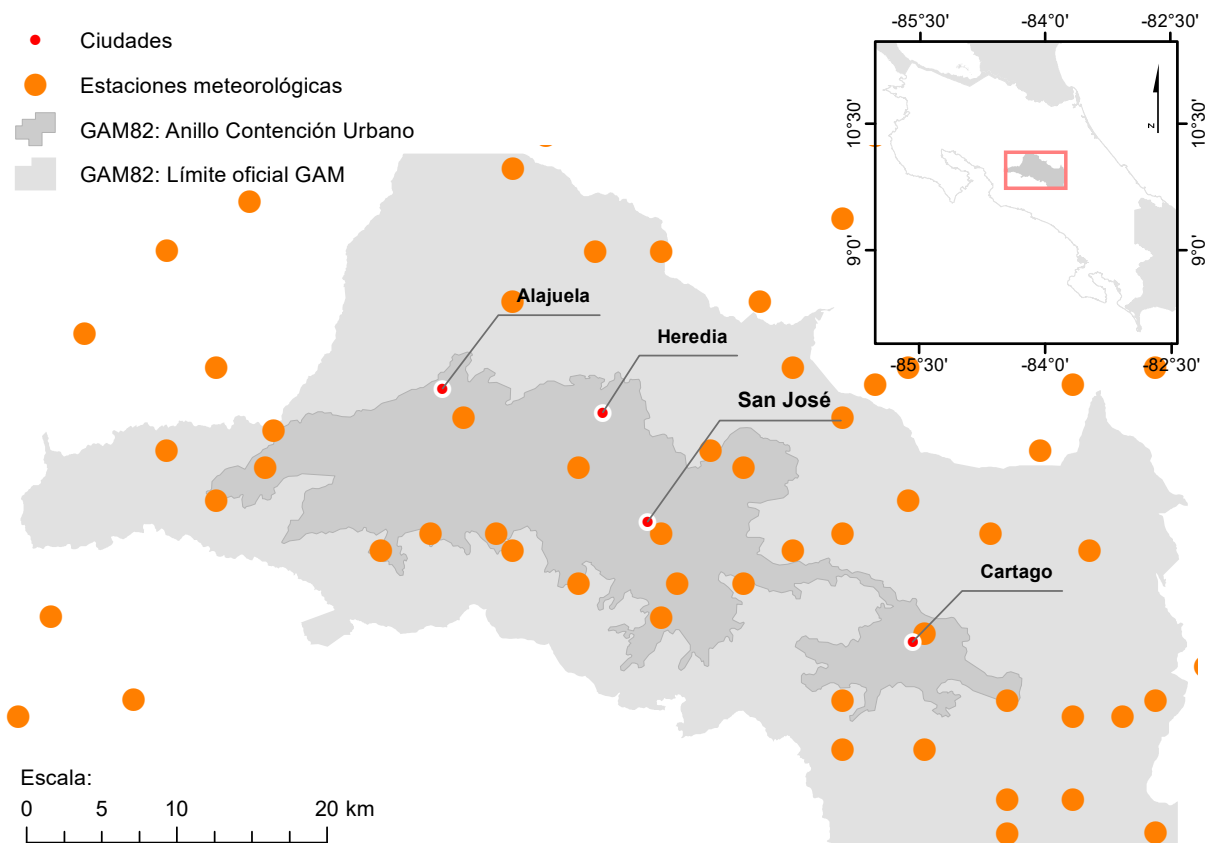


Figura 5: GAM: Estaciones meteorológicas del IMN. Nota: Algunas estaciones presentan períodos cortos o necesitan ser normalizados.

El uso urbano

Es común encontrar en la literatura especializada, el efecto de las áreas urbanas sobre el clima (Jacobson y Ten Hoeve 2012). Las áreas urbanas generalmente son más calientes que las áreas con cobertura vegetal alrededor de las estas, al reducir la evapotranspiración y tener diferencias significativas en las capacidades de calor, conductividad térmica, albedos y emisividad que aumentan el calentamiento urbano. El proceso de urbanización se considera como el caso más extremo de cambio de cobertura y uso de la tierra, y desde hace algunas décadas es un tema de interés en el Ordenamiento Territorial, la planificación urbana y la elaboración de políticas públicas (Comarazamy, J. E. González y Luvall 2015).

Una gran cantidad de científicos y planificadores se han enfocado en estudiar como los gases de efecto invernadero alteran el clima global, el cual se ha considerado la principal causa en el calentamiento global, sin embargo en un estudio financiado en el año 2002 por la NASA, estableció la importancia del cambio de uso y coberturas de la tierra como un factor mayor, en este fenómeno (Dispensa 2004).

Los cambios de largo período en los elementos de la superficie terrestre, como la alteración del uso/cobertura de la tierra, la dinámica de la vegetación, cambios en la humedad del suelo; suelen llevar a variaciones inter-anales en el (*Land surface albedo* LSA). A su vez, los cambios en el LSA brindan información sobre el clima y sus patrones(Wang *et al.* 2013). A largo plazo los registros de LSA son una fuente fundamental para el monitoreo ambiental y entender la interacción entre los cambios de la superficie y el sistema climático.

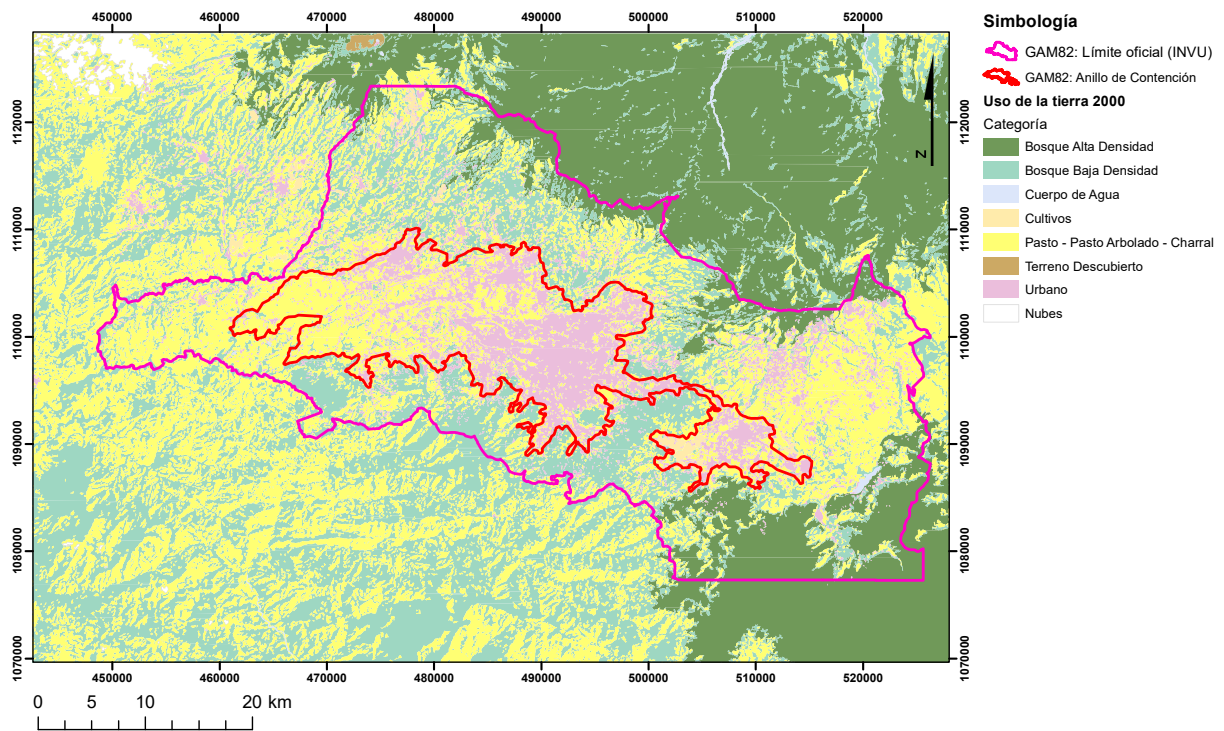
Este apartado pretende estudiar el cambio de uso/cobertura de la tierra, mediante el análisis de los mapas de uso/cobertura, los valores de albedo e índices de disturbio o cambio en la superficie terrestre, dada la relación que se establece entre estos parámetros y la variabilidad climática en entornos urbanos.

Se emplea el método utilizado en (Barrantes-Sotela y Sandoval-Murillo 2016), que consiste en el uso de un proceso de Clasificación Supervisada mediante el método de máxima similitud, el cual genera para cada firma espectral el establecimiento de una función de densidad para todos lo pixeles

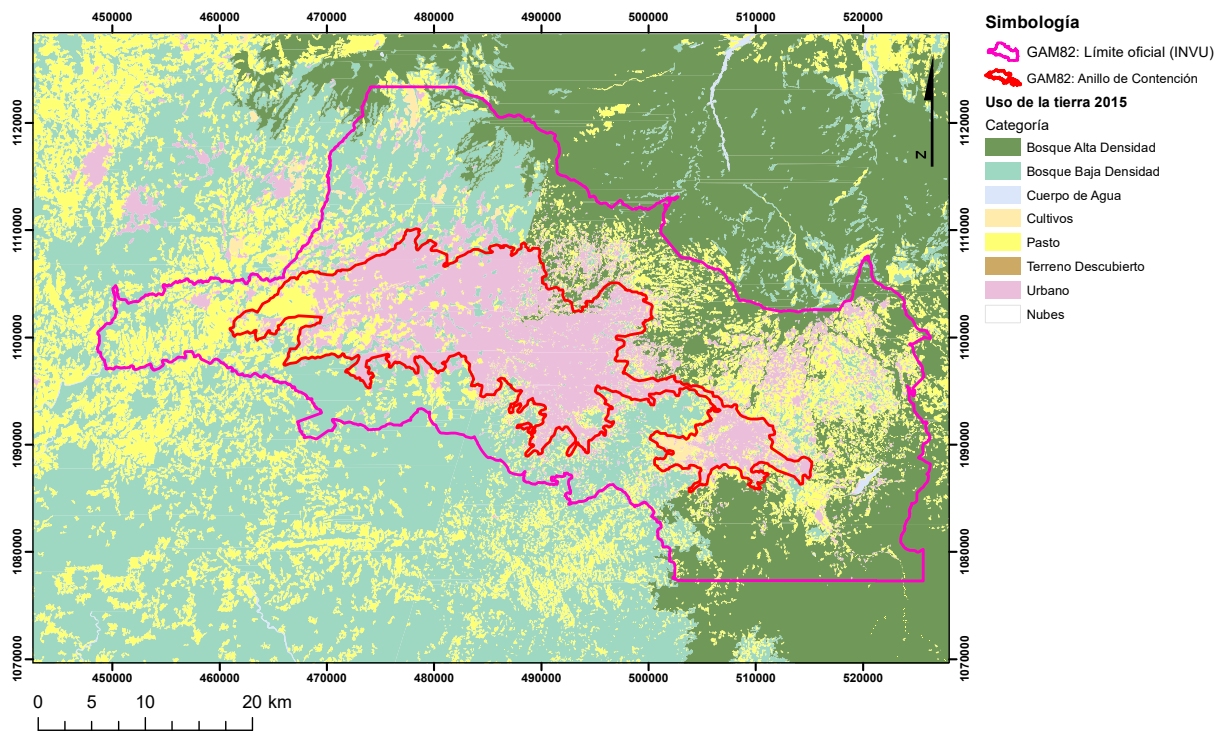
PALABRAS CLAVE:

- **Evapotranspiración** - Cantidad de agua del suelo que vuelve a la atmósfera como consecuencia de la evaporación y de la transpiración de las plantas.
- **Emisividad** - También conocida como emitancia, es la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debida a su temperatura.
- **Conductividad térmica** - Propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor.
- **Albedo** - Es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma. Las superficies claras tienen valores de albedo superiores a las oscuras, y las brillantes más que las mates.
- **Emisividad** - También conocida como emitancia, es la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debida a su temperatura.

incluidos en las áreas de entrenamiento, y se calcula los valores de probabilidad de pertenencia a una u otra categoría de información (Lillesand, Kieffer y Chipman 2007). En términos generales, consiste en crear zonas de isoprobabilidad alrededor de cada firma espectral y clasificar cada pixel dependiendo de su cercanía con estas. No obstante se varió el método al modificar el modo de determinar las funciones de probabilidad, en sustitución por probabilidades establecidas en forma a priori; de las cuales ya se conocían el comportamiento espectral de las coberturas y usos.



(a) GAM: Uso de la tierra, 2000.



(b) GAM: Uso de la tierra, 2015.

Figura 6: GAM: Uso de la tierra de los años 2000 y 2015. Elaborado mediante proceso de clasificación supervisada, proyección oficial CRTM05. Facilitado por (Morera y Sandoval 2016).

Albedo de la superficie terrestre

El albedo de la superficie terrestre (*Land surface albedo* LSA) es la proporción entre la radiación que refleja con respecto a la radiación que incide sobre la misma. Además determina el porcentaje de la radiación solar entrante que es reflejada de vuelta a la atmósfera. Según (Chen *et al.* 2008; Kala *et al.* 2014; Silva *et al.* 2016), es una de las claves del clima terrestre ya que determina, en parte, la cantidad de energía disponible necesaria para los diferentes procesos que ocurren en la atmósfera y en la superficie terrestre². Al ser considerada una variable crítica que afecta el clima terrestre y está entre las principales incertidumbres radiativas de los modelos climáticos (Chen *et al.* 2008), es importante su correcta determinación o parametrización, de lo contrario puede resultar en grandes sesgos en los modelos de balance de energía terrestres o de superficie, así como en el modelado del ciclo hidrológico y monitoreo ambiental (Trishchenko *et al.* 2008).

Tal como indica (Zhuo y Xubin 2010), las técnicas de sensores remotos proveen de manera frecuente y eficiente mapas globales de (LSA), de sensores como el *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), *Medium Resolution Imaging Spectrometer* (MERIS), *Clouds and the Earth's Radiant Energy System* (CERES) y el *Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer* (AVIRIS) y más reciente el *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS), que fue diseñado para mejorar las capacidades de operación del *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR). Otros algoritmos para el cálculo del albedo de la superficie pueden usar mediciones de las bandas 1 y 2 del AVHRR, algunos se basan en relacionar el espectro de las reflectancias planetarias de esas bandas al albedo de la superficie (Hucek y Jacobowitz 1995; Karlsson *et al.* 2013; Strugnell y Lucht 2001; Wydick, Davies y Gruber 1987).

Además existen una gran variedad de métodos y modelos para determinar albedos, como el *ECMWF land model*, *Noah land model*, *NCEP global model (NG)*, *CLARA-A1* y *NACAR CLM3*. Sin embargo, todos los modelos indicados anteriormente generalizan las categorías de cobertura de la tierra, principalmente en: **a)** nieve **b)** vegetación baja **c)** vegetación alta.

Debido a que la información generada de los sensores VIIRS y MODIS presenta una resolución espacial moderada, se dificulta las labores de identificar cambios de uso y coberturas de la tierra, especialmente en aquellas áreas con características heterogéneas como Costa Rica. Sin embargo para los sensores Landsat5 y Landsat7 existe diversa literatura, que precisa como calcular el albedo (Silva *et al.* 2016), mediante la combinación de las bandas reflectivas sin corrección atmosférica, para luego con los efectos atmosféricos se corrigen en base del planteamiento propuesto por (Zhong y Li 1988). Mientras que (Chen *et al.* 2008; S. Liang, Yu y Defelice 2005; Shunlin Liang *et al.* 2003; Shunlin y Strahler 1999; Strugnell y Lucht 2001; Tasumi, Allen y Trezza 2008), utilizan el plantamiento de (Zhong y Li 1988), pero con la diferencia en usar una corrección atmosférica a cada una de las bandas del

PARA CONSIDERAR:

Si la Tierra estuviera enteramente cubierta de nieve (mayor reflectancia), la temperatura promedio del planeta podría caer hasta -40°C . Si solo las masas continentales estuvieran cubiertas por glaciares, la temperatura promedio terrestre estaría entre los 0°C . Al contrario si todo el planeta estuviera cubierto de agua, la temperatura promedio sería aproximadamente de 28°C .

² Algunos ejemplos son la temperatura de la superficie, flujos de energía en el suelo-vegetación-atmósfera, evaporación y transpiración, formación de nubes, así como precipitación.

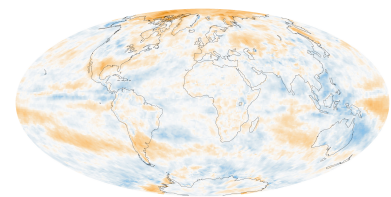


Figura 7: Albedo promedio mundial

sensor, obtenidas a partir de un modelo de transferencia de radiación. Estos resultados posteriormente pueden ser correlacionados con la información del VIIRS LSA y MODIS, así como la de uso/coertura de la tierra para determinar el patrón de distribución espacial del LSA (Wang *et al.* 2013).

El albedo es calculado a partir de la siguiente ecuación

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{atm}}{\tau_{oc}^2} \quad (1)$$

Donde:

Según (U.S Geological Survey 2016).

α_{toa} : Albedo planetario de cada pixel o albedo sin corrección atmosférica.

α_{atm} : Albedo atmosférico.

τ_{oc} : Transmitancia atmosférica en el dominio de radiación solar, (ecuación 2).

$$\tau_{oc} = 0,35 + 0,627 \exp \left[- \frac{0,00146 P_o}{K_t \cos Z} - 0,075 \left(\frac{W}{\cos Z} \right)^{0,4} \right] \quad (2)$$

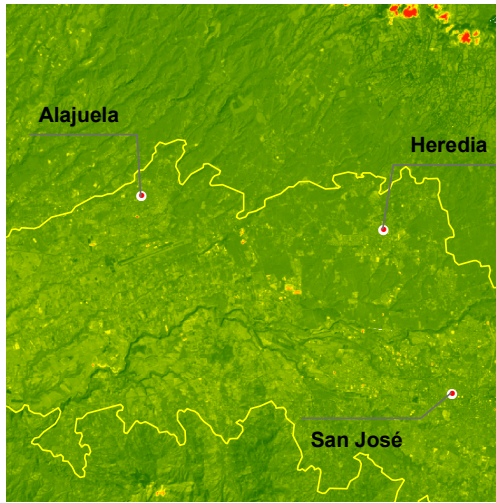
P_o : Presión atmosférica local (kPa). $W = 0,14 \exp_a$

K_t : Coeficiente de turbidez del aire.

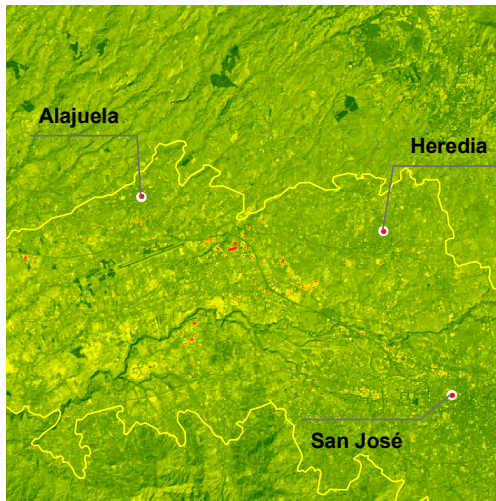
Z : Ángulo del cenit del Sol (Se extrae de los metadatos de la imagen de satélite).

($K_t = 1,0$ para aire limpio y $K_t = 0,5$ para aire extremadamente contaminado; $K_t = 1,0$, es el usado).

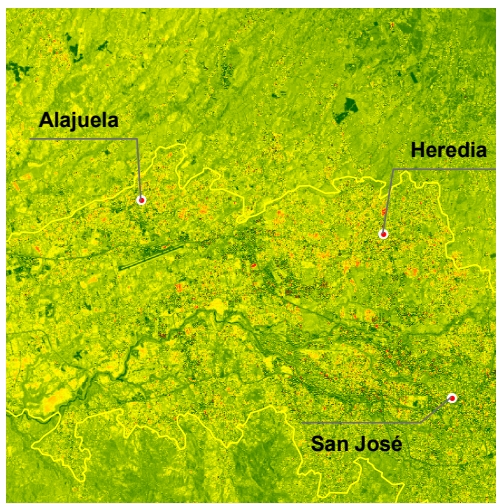
Para el caso del área de estudio se aplica el cálculo del albedo a las imágenes Landsat 5,7 y 8 disponibles.



(a) GAM 1986. Albedo



(b) GAM 2001. Albedo



(c) GAM 2016. Albedo

Figura 8: GAM: Cálculo del albedo, para los años 1986, 2001 y 2016.

Propiedades de radianza de materiales naturales

The following characteristics define the various environments:

Superficie	Rasgos principales	Albedo [α]	Emisividad [ϵ]
Suelo	Oscuro, húmedo	0.05 -	0.90 -
	Iluminado, seco	0.40	0.98
Desierto		0.20 - 0.45	0.84 - 0.91
Pasto	Alto (1.0 m)	0.16 -	0.90 -
	Corto (0.02m)	0.26	0.95
Cultivos agrícolas, tundra		0.18 - 0.25	0.90 - 0.99
Huertos		0.15 - 0.20	
Bosques	Deciduos	Descubierto	0.15 - 0.97
		Cubierto de hojas	0.20 0.98
Agua	Coníferas	ángulo de zenit pequeño	0.05 - 0.15 0.97 - 0.99
		ángulo de zenit largo	0.03 - 0.10 0.925 - 0.97
Nieve		ángulo de zenit largo	0.10 - 1.00 0.92 - 0.97
		Vieja	0.40 - 0.82 -
Hielo		Fresca	0.95 0.99
		Mar	0.30 - 0.45 0.92 - 0.97
	Glaciar	0.20 - 0.40	

Tabla 2: Propiedades radiativas de materiales naturales. **Fuente:** (Oke 2002; Sellers 1965)

Superficie	Rasgos principales	Albedo [α]	Emisividad [ϵ]
Caminos	Asfalto	0.05 - 0.20	0.95
Muros	Concreto	0.10 - 0.35	0.71 - 0.90
	Ladrillo	0.20 - 0.40	0.90 - 0.92
	Piedra	0.20 - 0.35	0.85 - 0.95
	Madera		0.90
Techos	Alquitrán y grava	0.08 - 0.18	0.92
	Azulejo	0.10 - 0.35	0.90
	Pizarra	0.10	0.90
	Paja	0.15 - 0.20	
	Hierro corrugado	0.10 - 0.16	0.13 - 0.28
Ventanas	Vidrio claro (\angle zenit $< 40^\circ$)	0.08	0.87 - 0.94
	Vidrio claro (\angle zenit entre $40^\circ - 80^\circ$)	0.09 - 0.52	0.87 - 0.92
Pintura	Blanca, Cal blanca	0.50 - 0.90	0.85 - 0.95
	Roja, café, verde	0.20 - 0.35	0.85 - 0.95
	Negra	0.02 - 0.15	0.90 - 0.98
Áreas urbanas ³	Rango	0.10 - 0.27	0.85 - 0.96
	Promedio	0.15	$\approx 0,95$

Tabla 3: Propiedades radiativas de típicos de áreas y materiales urbanos. **Fuente:** (Oke 2002; Sellers 1965)

Para realizar el cálculo de albedo, se basó en la metodología aplicada por (Silva *et al.* 2016).

³ Basado en ciudades de latitudes medias en condiciones libres de nieve.

Transformación Tasseled Cap (Kauth-Thomas) y valores de sesgo

La transformación Tasseled Cap [TCT] (Kauth-Thomas) está diseñada para analizar y representar cambios de vegetación y de desarrollo urbano detectados por diversos sistemas de sensor de satélite. Se conoce como la transformación Tasseled Cap debido a la forma de la distribución gráfica de los datos. Fue desarrollada en 1976 por R. J. Kauth y G. S. Thomas del Instituto de Investigación Medioambiental de Michigan (ERIM). En la investigación (Kauth y Thomas 1976), proporcionaron una lógica para los patrones encontrados en los datos del sensor MSS Landsat de campos agrícolas como una función del ciclo de vida del cultivo. Esencialmente, a medida que los cultivos crecen desde la semilla hasta la madurez, hay un aumento neto de infrarrojo cercano y una disminución de reflectancia roja con base en el color del suelo.

La utilidad de esta transformación se ha ampliado de los cultivos de seguimiento para al análisis y la representación cartográfica de la vegetación para apoyar una gran variedad de aplicaciones, como la silvicultura, la gestión de vegetación industrial, la representación cartográfica y la gestión de ecosistemas, el inventario y el control del aislamiento del carbono y los créditos, el desarrollo urbano, y muchas más. También se ha ampliado el soporte de Landsat MSS para incluir otros sistemas o sensores de satélite populares, como Landsat TM y Landsat ETM, IKONOS y los sensores multiespectrales de alta resolución QuickBird.

Entre las ventajas de la transformación Tasseled Cap se incluyen:

1. Proporciona una manera analítica para detectar y comparar los cambios en la vegetación, el suelo y en las características producidas por el hombre en períodos de corto y largo plazo
2. Proporciona una manera analítica para comparar directamente entidades de cobertura de suelo mediante imágenes de satélite de diferentes sensores, incluidos Landsat, IKONOS y QuickBird
3. Reduce la cantidad de datos de varias bandas multiespectrales a tres componentes principales: brillo, verdor y humedad (o material amarillo para Landsat MSS)
4. Reduce las influencias atmosféricas y los componentes de ruido en las imágenes, permitiendo un análisis más preciso

En el análisis de detección remota, es común relacionar y diagramar diferentes combinaciones de bandas multiespectrales para examinar las relaciones entre las bandas. La transformación Tasseled Cap es un caso especial de análisis de componentes principales que transforma los datos de imagen a un nuevo sistema de coordenadas con un nuevo conjunto de ejes ortogonales. El

eje principal, llamado **brillo**, se deriva estadísticamente y se calcula como la suma ponderada de las reflectancias de todas las bandas espectrales y representa la mayor variabilidad en la imagen. El **brillo** está asociado con el suelo descubierto o parcialmente cubierto, hecho por el hombre, y las entidades naturales como el concreto, el asfalto, la grava, los afloramientos de roca y otras áreas descubiertas. Ortogonal al primer componente, el segundo componente, el **verdor**, está asociado con la vegetación verde, mientras que el tercer componente, **humedad**, es ortogonal a los primeros dos componentes y se asocia con la humedad del suelo, el agua y otras entidades húmedas. En Landsat MSS, el tercer componente corresponde a material amarillo en lugar de la humedad, y representa los cultivos maduros listos para la cosecha, como diferentes cereales, así como la antigüedad de la vegetación. Los demás componentes adicionales contienen el ruido y las influencias atmosféricas de la imagen, como nubes, niebla, diferencias de ángulo solar y otras más, que se han retirado de los primeros tres componentes más importantes. Los tres primeros componentes de la imagen transformada con Tasseled Cap contienen cerca del 97 por ciento de la información significativa disponible en la imagen.

$$\text{Greenness} = B1_{REF} * \text{Coef}_{B1} + B2_{REF} * \text{Coef}_{B2} + B3_{REF} * \text{Coef}_{B3} + B4_{REF} * \text{Coef}_{B4} + B5_{REF} * \text{Coef}_{B5} + B7_{REF} * \text{Coef}_{B7}$$

Figura 9: Calculo Verdura

Landsat 5 TCT	(Azul) Banda 1	(Verde) Banda 2	(Roja) Banda 3	(NIR) Banda 4	(SWIR1) Banda 5	(SWIR2) Banda 7
Brillo (Brightness)	0.2043	0.4158	0.5524	0.5741	0.3124	0.2303
Verdura (Greenness)	-0.1603	-0.2819	-0.4934	0.7940	-0.0002	-0.1446
Humedad (Wetness)	0.0315	0.2021	0.3102	0.1594	-0.6806	-0.6109
TCT4	-0.2117	-0.0284	0.1302	-0.1007	0.6529	-0.7078
TCT5	-0.8669	-0.1835	0.3856	0.0408	-0.1132	0.2272
TCT6	0.3677	-0.8200	0.4354	0.0518	-0.0066	-0.0104

Tabla 4: Coeficientes de valores TCT para el sensor Landsat 5 en valores de reflectancia. **Fuente:** (Crist 1985)

Landsat 7 TCT	(Azul) Banda 1	(Verde) Banda 2	(Roja) Banda 3	(NIR) Banda 4	(SWIR1) Banda 5	(SWIR2) Banda 7
Brillo (Brightness)	0.3561	0.3972	0.3904	0.6966	0.2286	0.1596
Verdura (Greenness)	-0.3344	-0.3544	-0.4556	0.6966	-0.0242	-0.2630
Humedad (Wetness)	0.2626	0.2141	0.0926	0.0656	-0.7629	-0.5388
TCT4	0.0805	-0.0498	0.1950	-0.1327	0.5752	-0.7775
TCT5	-0.7252	-0.0202	0.6683	0.0631	-0.1494	-0.0274
TCT6	0.4000	-0.8172	0.3832	0.0602	-0.1095	0.0985

Tabla 5: Coeficientes de valores TCT para el sensor Landsat 7 ETM + en valores de reflectancia. **Fuente:** (Huang *et al.* 2002)

Landsat 8 TCT	(Azul) Banda 2	(Verde) Banda 3	(Roja) Banda 4	(NIR) Banda 5	(SWIR1) Banda 6	(SWIR2) Banda 7
Brillo (Brightness)	0.3029	0.2786	0.4733	0.5599	0.508	0.1872
Verdura (Greenness)	-0.2941	-0.243	-0.5424	0.7276	0.0713	-0.1608
Humedad (Wetness)	0.1511	0.1973	0.3283	0.3407	-0.7117	-0.4559
TCT4	-0.8239	0.0849	0.4396	-0.058	0.2013	-0.2773
TCT5	-0.3294	0.0557	0.1056	0.1855	-0.4349	0.8085
TCT6	0.1079	-0.9023	0.4119	0.0575	-0.0259	0.0252

Tabla 6: Coeficientes de valores TCT para el sensor Landsat 8 en valores de reflectancia. **Fuente:** (Baig *et al.* 2014)

Antes de proceder a realizar este tipo de transformación a una escena (imagen satelital), se debe aplicar un preproceso de corrección atmosférica. Según reportan (Bahadur 2009; Baraldi, Bruzzone y Blonda 2005; Huang *et al.* 2002), aplicar este tipo de transformación directamente al número digital (ND) puede ser problemático, al derivar en la propagación de anomalías y errores, producto de los cambio de iluminación solar que afectan la geometría

del ND, así como la presencia de nubosidad, neblina o presencia de partículas en la atmósfera.

Materiales

Para la elaboración de Transformación Tasseled Cap (Kauth-Thomas), se utilizó imágenes del sensor Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI (Tabla) y obtenidas de los archivos de la USGS por medio de la interfase *Earth Explorer*. Solo se seleccionaron escenas con un mínimo porcentaje de nubosidad. A las escenas se les aplicó un pre-procesamiento inicial, que consistió en una corrección radiométrica mediante la aplicación las ecuaciones de radiancia y reflectancia al número digital de las imágenes satelitales (Chuvienco 1999; Riaño, Salas y Chuvienco 2000) y cuyos datos se obtienen en los metadatos de la escena y de las especificaciones del sensor (U.S Geological Survey 2016).

Conversión a TOA Radiance

Se convierte a los valores de radianza espectral en la capa superior de la atmósfera.

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L \quad (3) \quad \text{Según (ibíd.).}$$

Donde:

L_{λ} : Radianza espectral TOA ($Watts / (m^2 * srad * \mu m)$)

M_L : Factor de multiplicación de re-escala de una banda específica, obtenida de los metadatos.

A_L : Factor aditivo de re-escala de una banda específica, obtenida de los metadatos.

Q_{cal} : Valor de Número Digital (DN) del producto estándar calibrado y cuantificado.

Conversión a TOA Reflectance

Se convierte a los valores de reflectancia espectral en la capa superior de la atmósfera.

$$\rho_{\lambda} = M_{\rho} * Q_{cal} + A_{\rho} \quad (4) \quad \text{Según (ibíd.).}$$

Donde:

ρ_{λ} : Reflectancia planetaria TOA, sin corrección de ángulo solar

M_{ρ} : Factor de multiplicación de re-escala de una banda específica, obtenida de los metadatos.

A_{ρ} : Factor aditivo de re-escala de una banda específica, obtenida de los metadatos.

Q_{cal} : Valor de Número Digital (DN) del producto estándar calibrado y cuantificado.

Conversión a TOA Reflectance con corrección del ángulo del sol

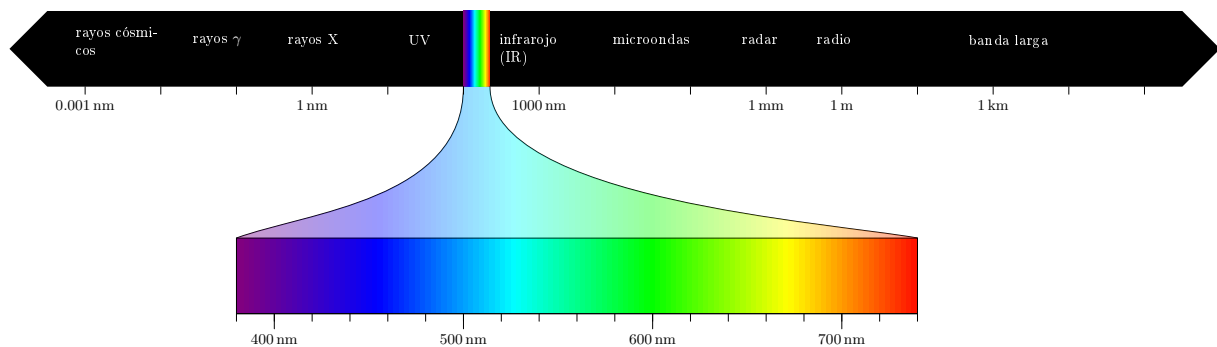
$$\rho_{\lambda} = \frac{\rho_{\lambda}'}{\cos(\theta_{SZ})} = \frac{\rho_{\lambda}'}{\sin(\theta_{SE})} \quad (5) \quad \text{Según (ibíd.).}$$

Donde:

ρ_{λ} : Reflectancia planetaria TOA

θ_{SE} : Ángulo local de elevación del sol. Obtenida de los metadatos.

θ_{SZ} : Ángulo local del cenit del sol. ($\theta_{SZ} = 90^{circ} - \theta_{SE}$)



Sensor	ID	Fecha
Landsat5 TM	LT50150531986037XXX18	1986-02-06 T 15:21:18.4820190Z
Landsat5 TM	L505053_053200101114	2001-01-14 T 15:34:15.7300130Z
Landsat8 OLI	LC80150532016104LGN00	2016-04-13 T 15:54:00.7884030Z
Landsat8 OLI	LC80150532017026LGN00	2017-01-26 T 15:54:30.2236900Z

Figura 10: Espectro electromagnético
Tabla 7: Material fotogramétrico utilizado en el TCT. Proyección UTM 16 N (WGS84). Resolución espacial 30 m.

Resultados del TCT

Según (Huang et al 2002), los cuerpos de agua presentan valores de alta humedad, bajo brillo y verdura. Mientras que los cultivos y cobertura boscosa tienen similares propiedades de humedad, pero difieren en sus respectivos valores de verdura.

Al paso del tiempo las coberturas y el uso de la tierra cambian, y de esa forma cambia la reflectancia de la superficie, y sus respectivos valores de brillo, humedad y verdor. Por ejemplo, los cambios de una cobertura de cultivos o bosque a áreas urbanas, se trazaría en el aumento del componente de brillo y una disminución significativa de verdor y humedad.

Cobertura T_0	Cobertura T_1	Brillo (B)	Verdor (G)	Humedad (W)
Bosque	Área urbana	↑	↓	↓
Cultivos	Cuerpo de agua	↓	↓	↑
Cultivos	Área urbana	↑	↓	↓

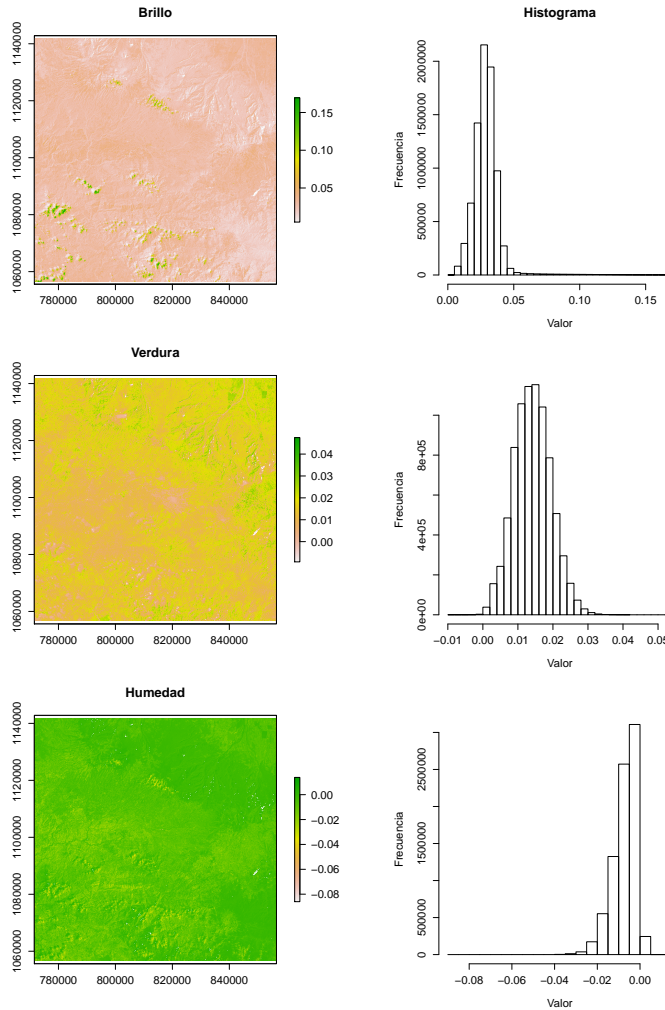


Figura 11: GAM 1986. Tasseled Cap: Brillo, Verdura, Humedad (suelo); con su respectivo histograma.

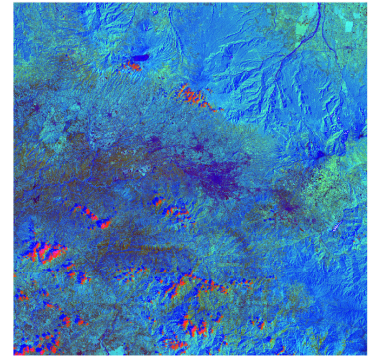


Figura 12: GAM 1986. Composición de las bandas brillo, verdura y humedad.

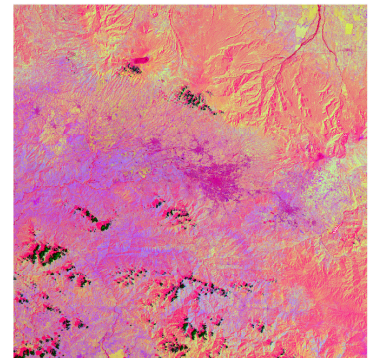


Figura 13: GAM 1986. Componentes Principales (PCA).

Banda	Comp.1	Comp.2	Comp.3	Comp.4	Comp.5	Comp.6
Azul	-0.424	-0.272	-0.368	0.775		-0.105
Verde	-0.438	-0.158	-0.363	-0.370	-0.187	0.692
Rojo	-0.442	-0.238	-0.143	-0.485		-0.695
NIR	-0.285	0.892	-0.298		0.164	
SW1	-0.409	0.195	0.631	0.160	-0.608	
SWI2	-0.431	-0.103	0.475		0.747	0.134
	Comp.1	Comp.2	Comp.3	Comp.4	Comp.5	Comp.6
Cargas SS	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Varianza proporcional	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167
Varianza acumulativa	0.167	0.333	0.500	0.667	0.833	1.000

Al analizar los resultados obtenidos del TCT para el año 1986, el componente que presenta la mayor amplitud y concentración de los valores normalizados de la distribución es el *verdor* o *verdura*, lo cual sugiere una alta presencia de cobertura verde. Mientras que si se analizan los valores con las desviaciones positivas significativas del componente *brillo*, resulta más fácil la identificación de las áreas con mayor reflectancia (es decir áreas urbanas). Los valores negativos del componente de *humedad del suelo*, indican la poca presencia de humedad del suelo o de cuerpos de agua.

Tabla 8: GAM 1986. PCA: Cargas factoriales. Según los datos y bajo el criterio del porcentaje de varianza, es posible identificar cuatro componentes principales: el primero que agrupa las bandas Verde y Rojo. El segundo que solo señala a la banda NIR. Un tercer componente que agrupa las bandas de onda corta SW1 y SW2. Por último, un componente menos significativo asociado a la banda Azul. Se observa que este método no es concluyente, con respecto a sus resultados, al ser difusos y difíciles de interpretar.

Skewness con ajuste de tamaño de muestra:

$$G_1 = \frac{\sqrt{N(N-1)}}{N-1} \times \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^3 / N}{s^3}$$

GAM 1986. Coeficientes de simetría.

Componente	Skewness	Kurtosis
Brillo	4.083475	37.02294
Verdor	0.1617105	2.948529
Humedad	-1.077868	4.48194

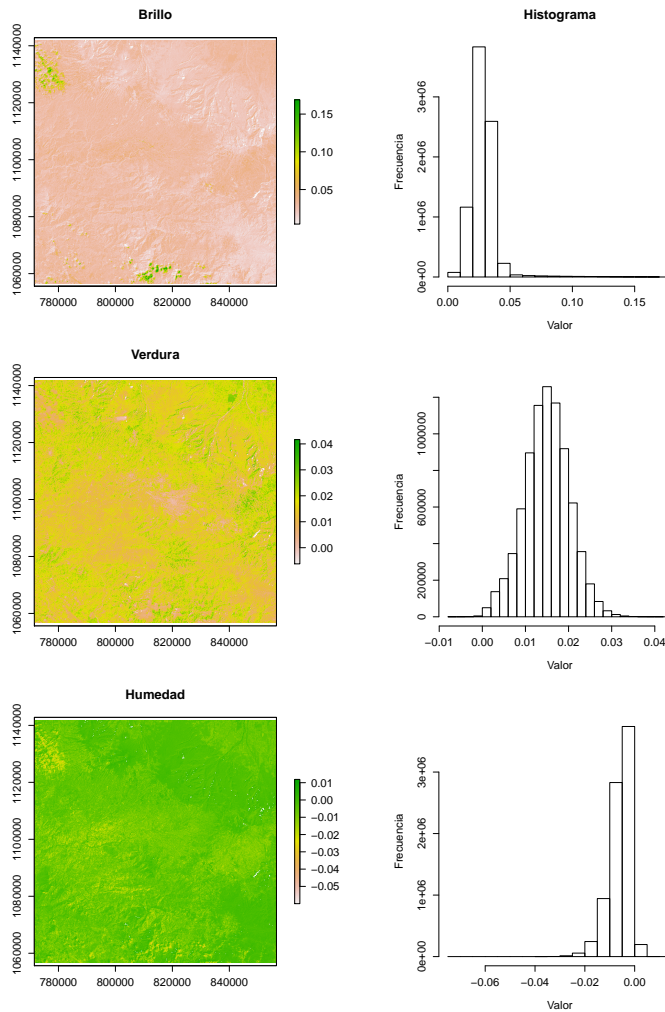


Figura 14: GAM 2001. Tasseled Cap: Brillo, Verdura, Humedad (suelo); con su respectivo histograma.

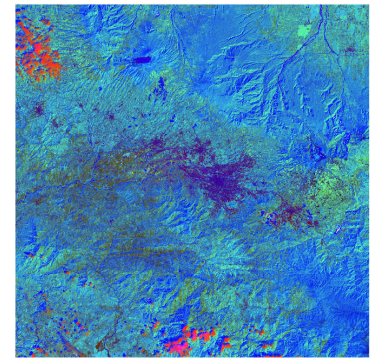


Figura 15: GAM 2001. Composición de las bandas brillo, verdura y humedad.

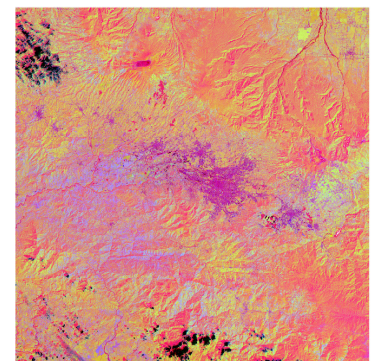


Figura 16: GAM 2001. Componentes Principales (PCA).

Banda	Comp.1	Comp.2	Comp.3	Comp.4	Comp.5	Comp.6
Azul	-0.424	-0.317	-0.323	0.762	-0.142	-0.125
Verde	-0.438	-0.221	-0.306	-0.371	-0.125	0.716
Roja	-0.437	-0.280	-0.120	-0.517		-0.670
NIR	-0.293	0.815	-0.448		0.209	
SW1	-0.408	0.326	0.562		-0.641	
SWI2	-0.431		0.521	0.119	0.713	0.132
	Comp.1	Comp.2	Comp.3	Comp.4	Comp.5	Comp.6
Cargas SS	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Varianza proporcional	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167
Varianza acumulativa	0.167	0.333	0.500	0.667	0.833	1.000

Tabla 9: GAM 2001. PCA: Cargas factoriales.

Para el año 2001, los valores normalizados de los componentes en los histogramas se acrecientan en comparación al año 1986. La distribución de los valores del componente de *brillo* varía de manera significativa en el tercer y cuarto cuantil (asimetría positiva), con presencia de valores extremos superiores a la derecha y evidenciando el crecimiento de la mancha urbana de la GAM. El componente de *verdor* presenta un cambio con respecto a la varianza de los datos que es menor con respecto al año 1986, pero mantienen una distribución simétrica. Situación que puede derivarse a que los parches verdes principales se conserven de alguna manera estables.

GAM 2001. Coeficientes de simetría.

Componente	Skewness	Kurtosis
Brillo	4.080455	34.80496
Verdor	-0.03379328	0.0733417
Humedad	-1.211618	2.337177

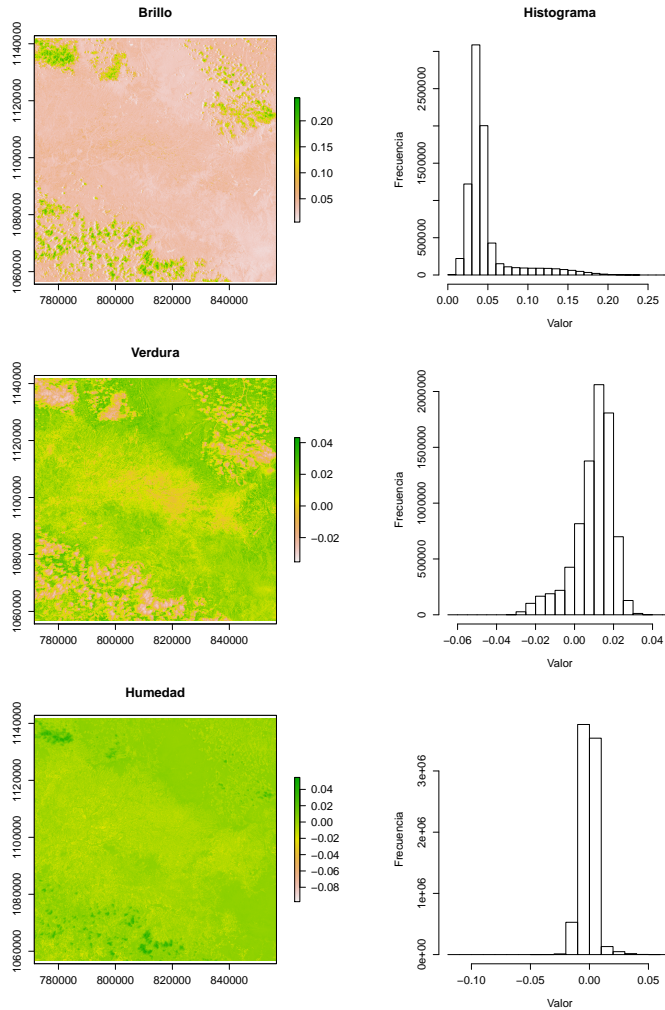


Figura 17: GAM 2016. Tasseled Cap: Brillo, Verdura, Humedad (suelo); con su respectivo histograma.

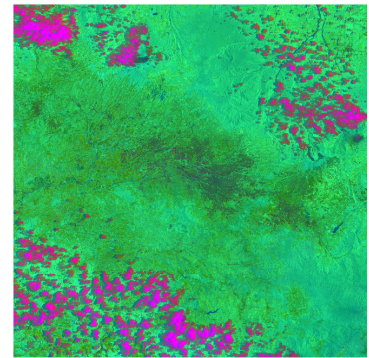


Figura 18: GAM 2016. Composición de las bandas brillo, verdura y humedad.

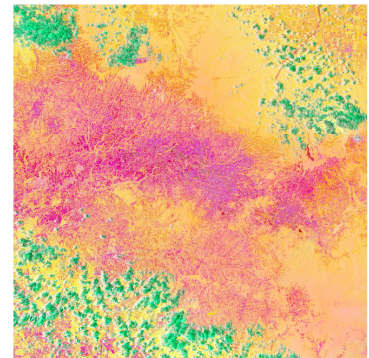


Figura 19: GAM 2016. Componentes Principales (PCA).

Banda	Comp.1	Comp.2	Comp.3	Comp.4	Comp.5	Comp.6
Blue	-0.417		-0.445		0.673	-0.404
Green	-0.420		-0.365			0.825
Red	-0.421		-0.344	-0.240	-0.703	-0.389
NIR	-0.378	-0.771	0.462	0.196		
SW1	-0.406	0.334	0.533	-0.631	0.201	
SW2	-0.406	0.525	0.228	0.710		
	Comp.1	Comp.2	Comp.3	Comp.4	Comp.5	Comp.6
Cargas SS	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Varianza proporcional	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167
Varianza acumulativa	0.167	0.333	0.500	0.667	0.833	1.000

Tabla 10: GAM 2016. PCA: Cargas factoriales.

Con los datos del año 2016, la tendencia de cambio es evidente. La distribución de los datos normalizados del componente *brillo*, aumentó en la amplitud del tercer y cuarto cuantil con respecto a los años anteriores. Mientras que ocurre un cambio en la simetría del componente *verdor*, ahora con una clara distribución de asimetría negativa. La ganancia de brillo con respecto a la pérdida de verdor, corresponde a un cambio muy significativo de áreas verdes que ahora son áreas con cobertura antrópica. Este cambio de tendencia, no solo ocurre con respecto a la cantidad de superficie utilizada, sino también en su distribución espacial.

GAM 2016. Coeficientes de simetría.

Componente	Skewness	Kurtosis
Brillo	2.669143	7.29278
Verdor	-1.155388	1.488123
Humedad	0.6949743	5.275814

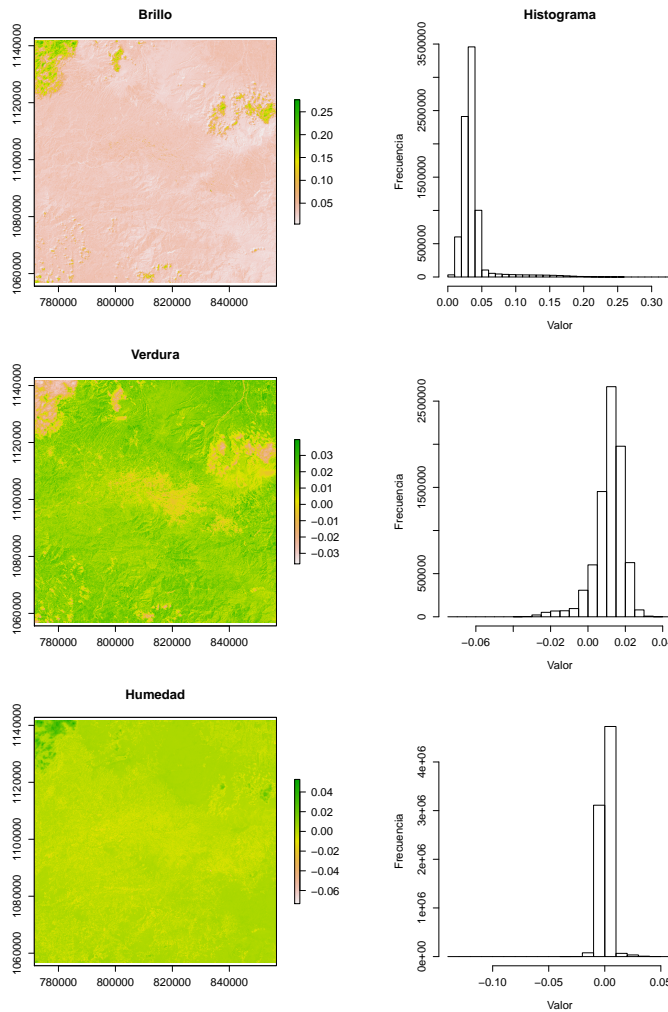


Figura 20: GAM 2017. Tasseled Cap: Brillo, Verdura, Humedad (suelo); con su respectivo histograma.

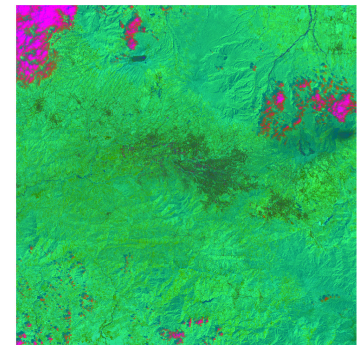


Figura 21: GAM 2017. Composición de las bandas brillo, verdura y humedad.

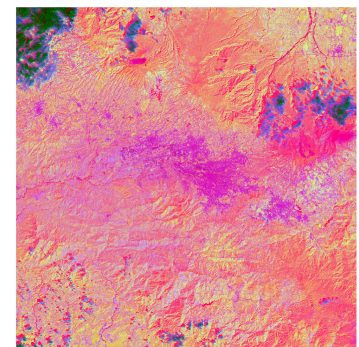


Figura 22: GAM 2017. Componentes Principales (PCA).

Banda	Comp.1	Comp.2	Comp.3	Comp.4	Comp.5	Comp.6
Blue	-0.421	-0.282	-0.324		0.677	-0.419
Green	-0.432	-0.238	-0.240			0.834
Red	-0.471	-0.330	-0.142		-0.722	-0.357
NIR	-0.421	0.846	-0.269	0.176		
SW1	-0.377	0.155	-0.652	-0.634		
SW2	-0.308	-0.124	0.565	0.748	0.107	
	Comp.1	Comp.2	Comp.3	Comp.4	Comp.5	Comp.6
Cargas SS	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Varianza proporcional	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167
Varianza acumulativa	0.167	0.333	0.500	0.667	0.833	1.000

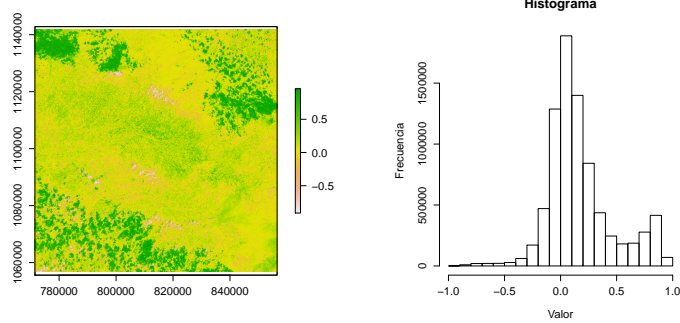
Tabla 11: GAM 2017. PCA: Cargas factoriales.

Con los datos del año 2017, la tendencia de cambio se incrementa con respecto al 2016. La distribución de los datos normalizados del componente *brillo*, aumentó en la amplitud del tercer y cuarto cuantil con respecto a los años anteriores. Se mantiene la característica de asimetría negativa del componente *verdor*. La ganancia de brillo con respecto a la pérdida de verdor, indica un incremento constante de cambio de áreas verdes a usos más antrópicos. Se mantiene la tendencia espacial descrita en el año anterior (2016).

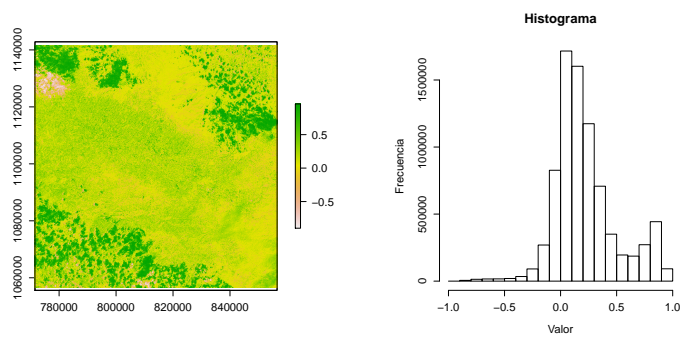
GAM 2016. Coeficientes de simetría.

Componente	Skewness	Kurtosis
Brillo	4.216546	21.50802
Verdor	-1.522533	4.095231
Humedad	1.10449	11.57453

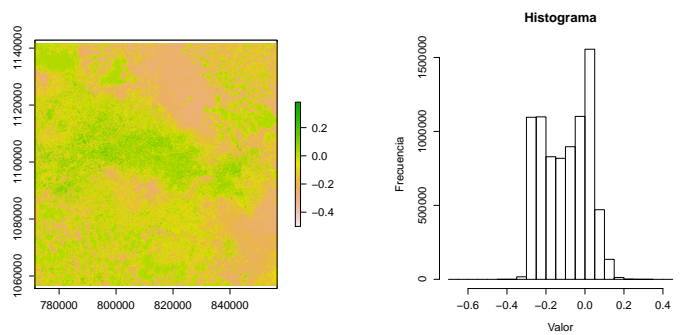
Se identifica un patrón espacial difuso y aledaño a las áreas urbanas centrales identificadas en los años anteriores



(a) GAM 1986. NDVI e histograma



(b) GAM 2001. NDVI e histograma



(c) GAM 2016. NDVI e histograma

Figura 23: GAM 1986, 2001 y 2016. NDVI; con su respectivo histograma.

Índice de disturbio (*disturbance index*)

Según (Healey *et al.* 2005), el *índice de disturbio* (DI) fue diseñado para estudiar aquellas firmas espectrales de áreas no forestales que destacan y están asociadas con disturbios por remplazo, así como separar de las mismas las otras firmas espectrales de zonas boscosas.

Los criterios para escoger una estructura de datos, responde a las necesidades del fenómeno ha estudiar. La transformación de los datos se realiza en función de los diferentes atributos que la componen o quieren destacarse, es así como para la detección de disturbios, las transformaciones deben estar orientadas a maximizar las distancias espectrales y la separabilidad del espectro entre lo que se considera alterado y no alterado en las secciones boscosas. En este caso, al establecer una señal de disturbios, se busca escoger una estructura de datos que pueda ofrecer características de fuerza, duración y robustez en la transformación de los datos con la menor cantidad posible de bandas.

El DI es una combinación lineal de los tres componentes del *Tasseled Cap*, considerando el supuesto de que las áreas de bosque que experimentaron un reciente cambio a otras coberturas/usos de tipo antrópicas o áreas descubiertas (suelo expuesto), presentarán un valor alto en *brillo* (\uparrow) y valores bajos en *verdura* (\downarrow) y *humedad* (\downarrow), en relación con áreas que no han sido alteradas por la actividad humana.

Usualmente el propósito de usar un análisis de composición de bandas del *índice de disturbio*, es la detección de cambios a escala regional con respecto a la pérdida de áreas verdes (Arnett *et al.* 2014; Healey *et al.* 2005; Mišurec *et al.* 2016). En este caso particular, el DI se utiliza para estudiar en el área de estudio como la expansión del uso urbano o la pérdida de cobertura verde favorecen el incremento del brillo asociado al albedo de estas superficies, y que puede ser una factor a considerar en el incremento de las temperaturas en las ciudades.

Metodología

$$\begin{aligned} B_r &= (B - B_\mu / B_\sigma) \\ G_r &= (G - G_\mu / G_\sigma) \\ W_r &= (W - W_\mu / W_\sigma) \end{aligned} \quad (6)$$

Donde:

- B_r, G_r, W_r : Re-escalamiento o estandarización de Brillo, Verdura y Humedad.
- B_μ, G_μ, W_μ : Media de las zonas de bosque en las bandas de Brillo, Verdura y Humedad.
- $B_\sigma, G_\sigma, W_\sigma$: Desviación estándar de las zonas de bosque en las bandas de Brillo, Verdura y Humedad.

Es decir, el proceso de re-escalamiento normaliza los valores de los píxeles en las bandas del Tasseled Cap, lo que permite una subsecuente combinación algebraica de cada una de las bandas.

Para el cálculo de las medias y desviaciones estándar de los valores de píxeles de bosque, se seleccionó las zonas boscosas de más de 50000 m^2 de un uso/cobertura de la tierra identificadas en el año 2000, información generada mediante una clasificación supervisada y que presentaran un valor de índice de forma (SI) elevado. A esa selección se aplicó un muestreo aleatorio simple.

$$n_o = \left(\frac{Z \cdot \sqrt{p \cdot q}}{d} \right)^2 \quad (7)$$

Donde

n_o : Tamaño de muestra para la población infinita.

Z : Nivel de confianza deseado, según la tabla normal (NC 95 %).

p : Probabilidad de éxito. Se considera el 50 %.

q : Probabilidad de fracaso (1-p).

d : Error de estimación o error de muestreo.

Para el cálculo de la muestra, se uso un nivel de significancia ($\alpha = 0,02$), es decir un nivel de confianza del 95 %. Además se considera una probabilidad máxima de éxito del 50 % y un error de estimación del 2 %.

$$n_o = \left(\frac{1,645 \cdot \sqrt{0,5 \cdot 0,5}}{0,02} \right)^2 \approx 1692$$

Una vez establecido el muestreo simple aleatorio espacial, se procede a extraer los valores para cada una de las bandas (Brillo, Verdura, Humedad), así como de los descriptores estadísticos, de las medidas de centralidad y dispersión (media y desviación estándar). Estos valores, se usan para normalizar cada una de las bandas, en los diferentes períodos establecidos, para el cálculo del Índice de Disturbio.

$$DI = Brillo_{(z;t)} - \left(Verdura_{(z;t)} + Humedad_{(z;t)} \right)$$

Una vez, que se obtiene el índice de disturbio para los años 1986, 2001, 2016; se generará una imagen compuesta temporal (RGB), (Banda roja = 1986); (Banda verde = 2001) ; (Banda azul = 2016). Esto para facilitar el análisis del cambio temporal de los disturbios presentes en el área de estudio.

```

1 library(sp)
2 library(rgdal)
3 #Abrir shapefile con
4 puntos de muestra
5 pf <- readOGR("/shp", "
6 muestraF01F02")
7 #Selección aleatoria
8 simple con tamaño de
9 muestra n
10 muestra <- spsample(pf,
11 n, 'random')
```

Además se elaboran los gráficos de dispersión, que permiten establecer el comportamiento del índice de disturbio, para cual se calculan los límites de confianza para cada una de las variables [Brillo, Verdura, Humedad] de cada año y se extraerán los datos más significativos, según una distribución de probabilidad normal con un $Z_{(\alpha=0,025)} = 1,959964$. Por la gran cantidad de datos, para su representación gráfica se elaboró una selección por muestreo aleatorio de 1692 datos.

Al representar cada uno de los componentes del Tasseled Cap (Brillo, Verdura y Humedad) con un plano de transformación del Índice de Disturbio (DI) en un gráfico de dispersión de tres ejes (Figura). Se puede observar como este plano, divide el espacio del Tasseled Cap en una forma apropiada para identificar un perfil de aquello que está alterado y lo que no.

Por lo tanto, es posible realizar una serie de agrupaciones de los valores numéricos del DI por su derivación del TCT, mediante ciertos criterios de selección y que debido al ser una transformación de dimensión de información más reducida, permiten un proceso de clasificación supervisada más eficiente al contener menor ruido en los datos.

Para asegurar que el modelo de regresión del plano de transformación sea estadísticamente aceptable, se empleó la técnica de muestreo Bootstrap:

$$LC_{1,2} = \bar{X}_i \pm Z_{(\alpha=0,025)} \times \frac{s}{\sqrt{n_i}}$$

```

library(boot)
# libera memoria sin
  usar
gc()
4  sampling <- function(
  formula, data, indices)
  {
    d <- data[sample(1:
nrow(data), 1692,
replace = T), ]
6  d.sample <- d[indices
,]
    fit <- lm(formula,
data=d.sample)
8  %return(summary(fit)
$r.square)
  }
10 boot.data <- boot(data=
data_lc, statistic=
sampling, R = 99,
formula= Brillo ~
Verdura + Humedad)

```

Año	Permutación	original	$LC_{i(\alpha=0,1)}$	$LC_{s(\alpha=0,1)}$	bias	std. error
1986	99	0.6886432	0.6572	0.8436	-0.06175471	0.05666575
2001	99	0.397	0.6493	0.56423	0.04110315	.07668005
2016	99	0.5107	0.6478	0.5744087	-0.00485499	.04169598

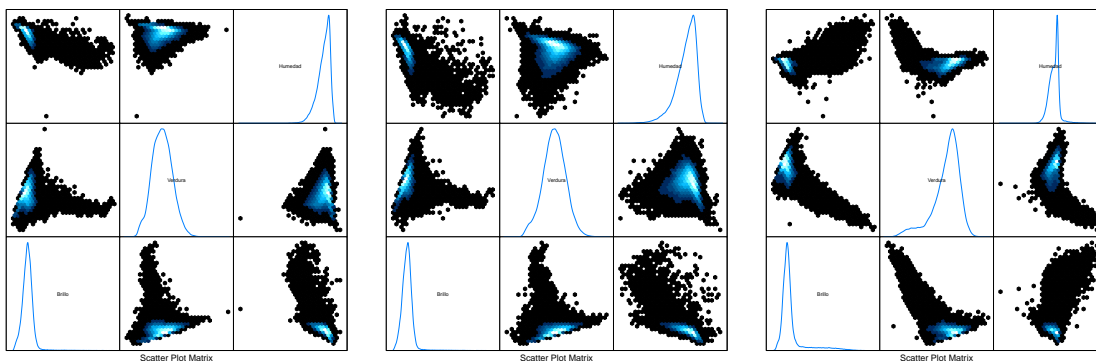
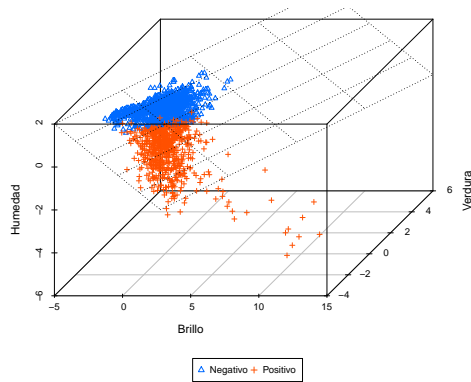
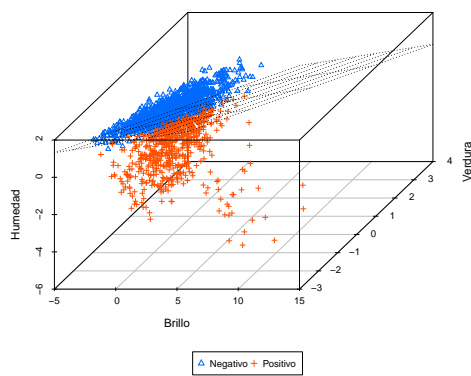


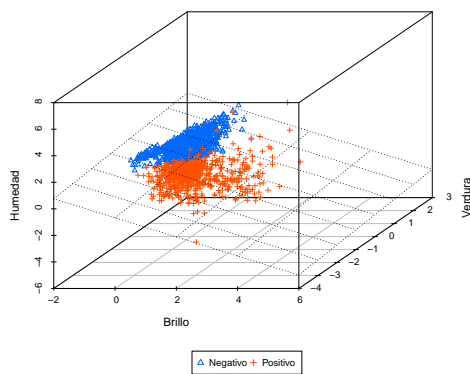
Figura 24: Dispersión de los componentes del TCT, para los años 1986, 2001 y 2016.



(a) GAM 1986. Gráfico de dispersión del Tasseled Cap: Brillo, Verdura, Humedad (suelo)



(b) GAM 2001. Gráfico de dispersión del Tasseled Cap: Brillo, Verdura, Humedad (suelo)



(c) GAM 2016. Gráfico de dispersión del Tasseled Cap: Brillo, Verdura, Humedad (suelo)

Figura 25: Gráficos de dispersión del proceso de Tasseled Cap normalizado con el plano de la regresión de transformación del DI. Los valores del DI se representan en azul para los negativos (DI -) y rojo para los valores positivos (DI +). Solo se representan 1692 datos. El remuestreo de 1692 datos fue calculado mediante un bootstrap de 99 permutaciones.

Resultado del DI

Para demostrar que los valores del DI incrementaron con respecto a cada año observado, se opta por aplicar una prueba de hipótesis no paramétrica de Wilcoxon pareada⁴, con un $\alpha = 0,05$. Lo anterior basado en los resultados de la prueba de Skewness, que determinó que las series de datos del *Tasseled Cap* cumplen las características de ser una distribución no normalmente distribuida.

Para ambos casos la prueba se Wilcoxon rechaza las hipótesis nulas establecidas, por lo que se concluye estadísticamente, que los valores del índice de disturbio se han incrementado entre el período de estudio de 1986 al 2016.

Sobresale el período entre 2001 y el 2016, en el cual el DI se ha incrementado notablemente, si se analiza con respecto al componente del Brillo del TCT, lo que no solo sugiere que se transformaran nuevas áreas verdes, sino que también aquellas áreas con valores altos de reflectancia aumentarán esa condición, al percibir una aglomeración más densa de esas áreas.

Las condiciones de agrupamiento espacial indican, que la mayoría de los disturbios de superficies con verdor que pasaron a características moderadas y altas de brillo ocurrieron en el exterior o en la periferia del anillo de contención urbana de la GAM. Mientras que el incremento de las superficies de brillo moderado a alta, se dieron al interior del anillo de contención.

⁴ Se considera una prueba pareada, debido a los datos son espaciales y se extraen del mismo lugar, pero en años diferentes.

Pruebas de hipótesis

$$H_0 : \mu_{W_d} = 0$$

$$H_1 : \mu_{W_d} > 0$$

Donde: Prueba estadística W (Bauer 1972; Wilcoxon 1945).

$$W = \sum_{i=1}^{N_r} [\text{sgn}(x_{2,i} - x_{1,i}) \times R_i]$$

Pruebas 1986-2001 y 2016-2001:

$$W_{2001-1986} = 8966400 \quad \text{p-valor} = 0.3244$$

$$W_{2016-2001} = 9880800 \quad \text{p-valor} = 1.192e-13$$

En ambos casos la H_0 se rechaza.

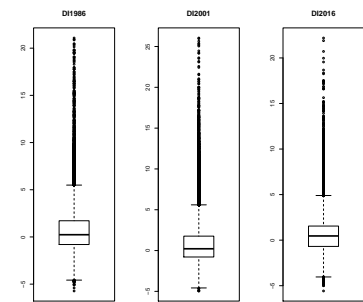
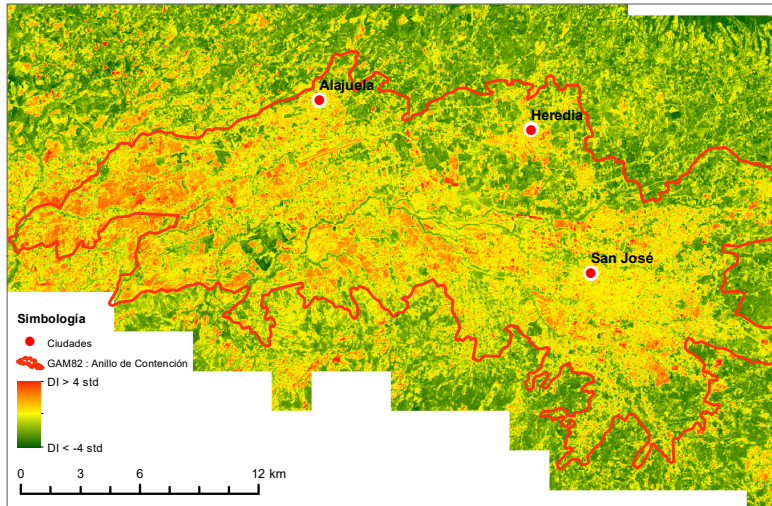
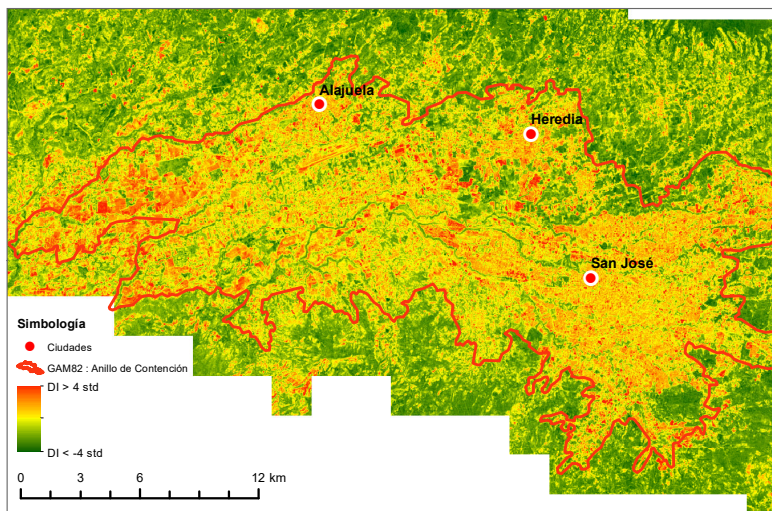


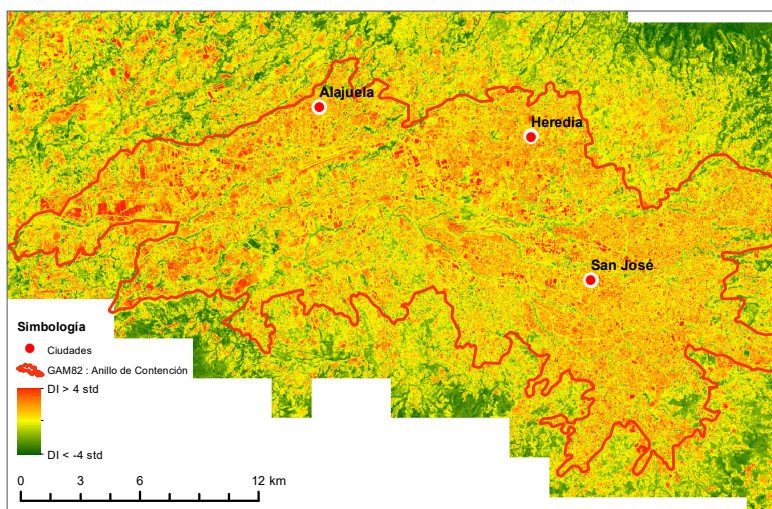
Figura 26: GAM. Índice de disturbio.



(a) GAM 1986 - Índice de Distubio.



(b) GAM 2001 - Índice de Distubio.



(c) GAM 2016 - Índice de Distubio.

Figura 27: Índice de disturbio para los años 1986, 2001 y 2016, en el Anillo de Contención Urbana del Plan GAM82.

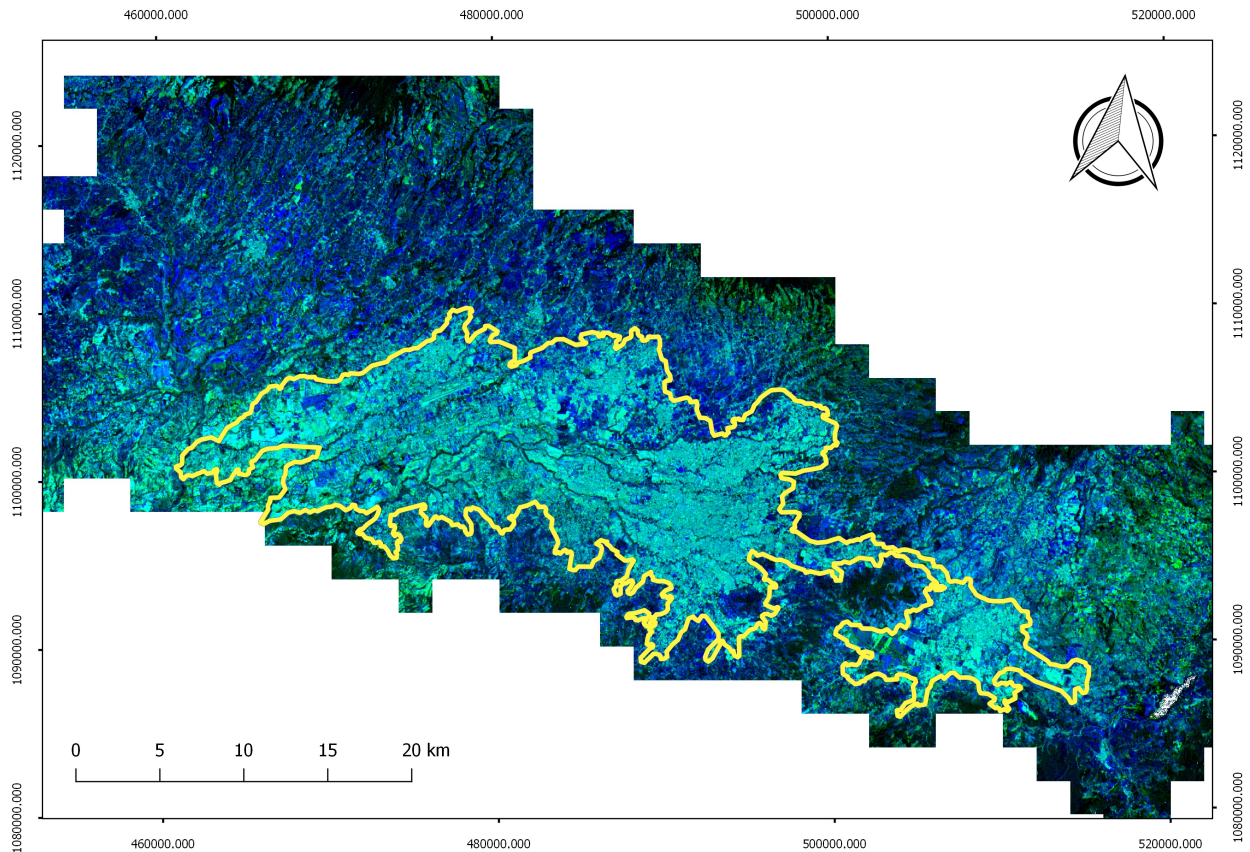


Figura 28: GAM: Índice de disturbio (DI) compuesto en el anillo de contención urbana oeste, para los años 1986, 2001 y 2016.

Al analizar la figura, que consiste en la combinación espacio-temporal de las tres capas de DI en una composición de tipo RGB, en la que se asoció la primera fecha (1986) a la banda roja, la segunda (2001) a la banda verde y la tercera (2016) a la banda azul. Según (Healey *et al.* 2005), dado el supuesto teórico que los valores altos de DI corresponden a las áreas con mayor disturbio asociado al incremento del brillo, es posible usar una lógica de color aditiva para interpretar la imagen multispectral resultante. Es así como las coloraciones con tonos más azules, representan valores altos en el DI de la tercera fecha, que indican disturbios entre el período de la segunda (2001) y tercera fecha (2016). Las áreas con coloraciones en cian (color celeste o azul claro saturado), presentan valores altos de DI en la segunda y tercera fecha pero no en la primera, lo que indica disturbios entre la primera y segunda fecha. Mientras que los colores amarillentos, altos en rojo y verde pero bajos en azul, sugieren disturbios que ocurrieron anteriormente a la primera fecha, pero que se han reverderizado en la tercera fecha.

Con la extracción de los datos de DI de las celdas en los tres años, se procedió a realizar una selección, que presentaran algunos de los criterios establecidos de la lógica de color aditiva, para evaluar la precisión de la identificación de los disturbios observados. Se escogieron los sitios, en los que anteriormente se tiene registro previo del patrón de alteración a evaluar.

Criterio 1 : Celdas en azul:

$$DI_{2016} > (\overline{DI}_{2016} + \sigma_{DI_{2016}})$$

$$DI_{2001} < (\overline{DI}_{2001} + \sigma_{DI_{2001}})$$

$$DI_{1986} < (\overline{DI}_{1986} + \sigma_{DI_{1986}})$$

Se logran identificar las áreas que presentaban algún tipo de verdor (bosque o cultivo permanente), que pasaron principalmente a terrenos descubiertos o en preparación para su cultivo. Algunos casos más representativos es el paso de cultivos de café con árboles a la preparación de cultivos de caña de azúcar o para la construcción. Figura 29(a).

Criterio 2 : Celdas en cian

$$DI_{2016} > (\overline{DI}_{2016} + 0,5 \times \sigma_{DI_{2016}})$$

$$DI_{2001} < (\overline{DI}_{2001} + 0,5 \times \sigma_{DI_{2001}})$$

$$DI_{1986} < (\overline{DI}_{1986} + 0,5 \times \sigma_{DI_{1986}})$$

Son las áreas que presentaban algún tipo de verdor (bosque o cultivo permanente), que pasaron principalmente a uso urbano, terrenos descubiertos o en preparación para su cultivo en la segunda fecha (2001), muchos de esos cambios persisten en la actualidad. Figura 29(b).

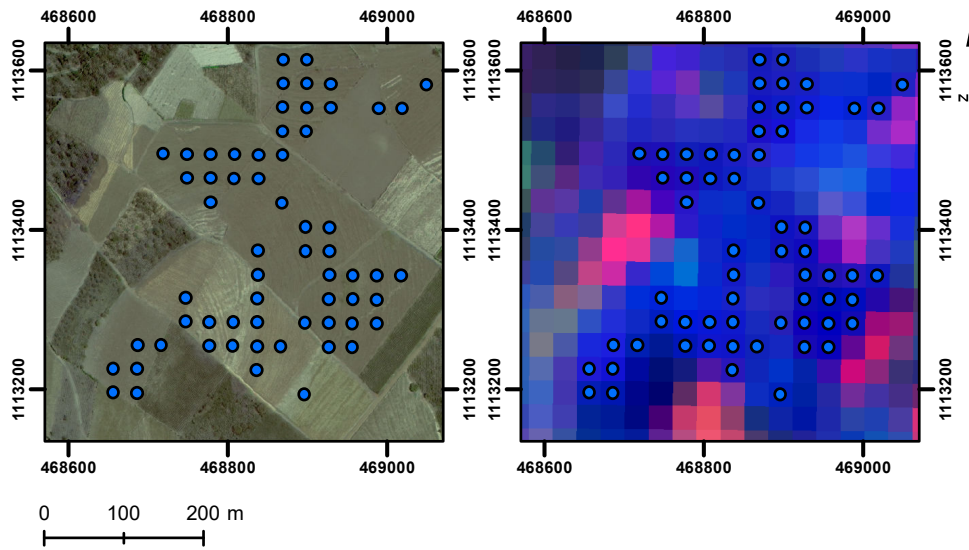
Criterio 3 : Celdas en amarillo

$$DI_{2016} < 0$$

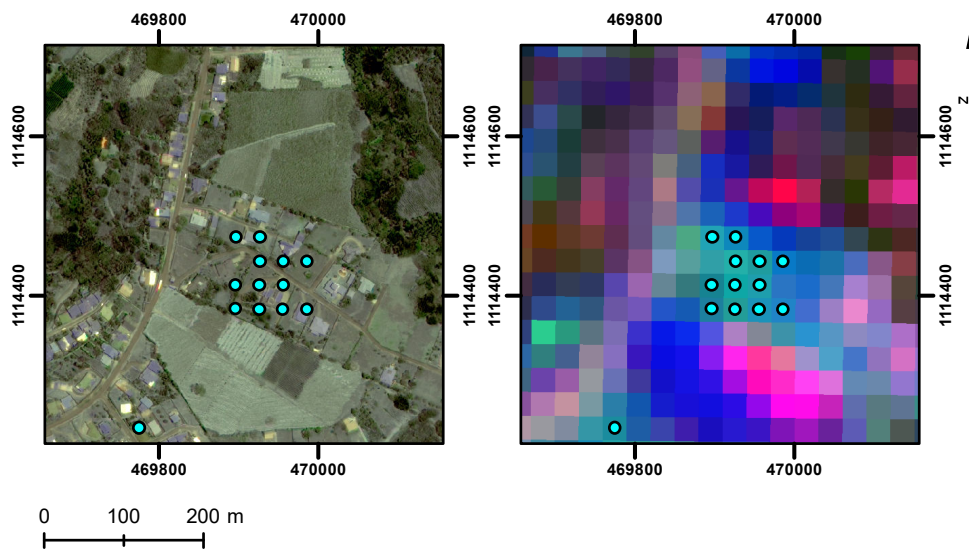
$$DI_{2001} > (\overline{DI}_{2001} + \sigma_{DI_{2001}})$$

$$DI_{1986} > (\overline{DI}_{1986} + \sigma_{DI_{1986}})$$

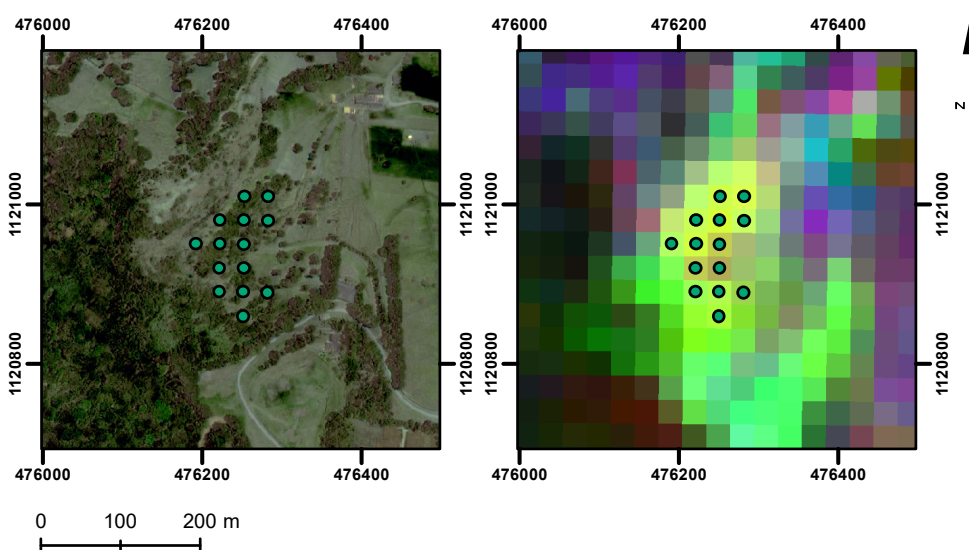
Son las áreas que se reforestaron a la tercera fecha (2016). Característicos de los matorrales o charrales, incluye bosques en regeneración por abandono de la actividad agropecuaria. Figura 29(c).



(a) Disturbios: Criterio 1 (Color azul)



(b) Disturbios: Criterio 2 (Color cian)



(c) Disturbios: Criterio 3 (Color amarillo)

Figura 29: Criterios de selección de DI según lógica aditiva de color, para los años 1986, 2001 y 2016. Se usa una imagen de alta resolución espacial (0.3 m) del 2016 para su verificación y de la que anteriormente se conoce la persistencia o el cambio de uso.

Bibliografía

- Arce, Milton y Víctor Acevedo (2014). *Análisis Comportamiento término y su relación con el uso de suelo en la formación del fenómeno Islas de Calor, en la aglomeración urbana de Heredia*. P. 156.
- Arnett, John T. T. R., Nicholas C. Coops, Sarah E. Gergel, Robert W. Falls y Russell H. Baker (2014). Detecting Stand-Replacing Disturbance using RapidEye Imagery: a Tasseled Cap Transformation and Modified Disturbance Index. En: *Canadian Journal of Remote Sensing* 40 (1), 1-14.
- Bahadur, K.K.C (2009). Improving Landsat and IRS Image Classification : Evaluation of Un-supervised and Supervised Classification through Band Ratios and DEM in a Mountainous Landscape in Nepal. En: *Remote Sensing* 1 (4), 1257-1272. DOI: 10.3390/rs1041257.
- Baig, Muhammad Hasan Ali, Lifu Zhang, Tong Shuai y Qingxi Tong (2014). Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. En: *Remote Sensing Letters* 5 (5), 423-431.
- Baraldi, Andrea, Lorenzo Bruzzone y Palma Blonda (2005). Quality Assessment of Classification and Cluster Maps Without Ground Truth Knowledge. En: *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing* 43 (4), 857-873.
- Barrantes-Sotela, O. y L. Sandoval-Murillo (2016). Uso/Cobertura de la tierra en los cantones de Upala, Guatuso y Los Chiles en el año 2011. En: *Revista Geográfica de América Central* 1 (56), 59-91. DOI: 10.15359/rgac.1-56.3.
- Bauer, David F. (1972). Constructing Confidence Sets Using Rank Statistics. En: *Journal of the American Statistical Association* 67 (339), 687-690. DOI: 10.1080/01621459.1972.10481279.
- CEPALFORJA (2012). *Cambio Climático y Ecosistemas en Centroamérica: una oportunidad para la acción*. San José: PEN.
- Chen, Y. -M., S. Liang, J. Wang, H. -Y. Kim y J. V. Martonchik (2008). Validation of MISR land surface broadband albedo. En: *International Journal of Remote Sensing* 29 (23), 6971-6983.
- Chuvieco, Emilio (1999). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Segunda. Madrid: Rialp, p. 449.
- Comarazamy, Daniel E., Jorge E. González y Jeffrey C. Luvall (2015). Quantification and mitigation of long-term impacts of urbanization and climate change in the tropical coastal city of San Juan, Puerto Rico. En: *International Journal of Low Carbon Technologies* 10 (1), 87-97.
- Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH) (2008). *El clima, su variabilidad y cambio climático en Costa Rica*. Inf. téc. IMN, p. 75.
- Crist, Eric P. (1985). A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data. En: *Remote Sensing of Environment* 17 (3), 301-306. DOI: 10.1016/0034-4257(85)90102-6.
- Dispensa, Jaclyn M. (2004). *Separation of use or misuse: Multifaceted empirical study of zoning variances*. English. Copyright - Copyright UMI - Dissertations Publishing 2004; Last updated - 2015-08-23; First page - n/a. Tesis doct. Drexel University, 169-169 p.
- Ezquiaga Domínguez, J. M. (2010). *Estrategias de adaptación y mitigación del Cambio Climático en planificación espacial. Selección y análisis de buenas prácticas y formulación de criterios de aplicación en el planeamiento territorial y urbanístico del la CAPV*. Inf. téc. Dirección General de Ordenación del Territorio del Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio del Gobierno Vasco, p. 54.
- González, Mayela y Eloisa Saenz (1996). *Crecimiento urbano y planificación local: El caso de la ciudad de Cartago*. Tesis doct., p. 159.
- Healey, Sean P., Warren B. Cohen, Yang Zhiqiang y Olga N. Krankina (2005). Comparison of Tasseled Cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection. En: *Remote Sensing of Environment* 97 (3), 301-310. DOI: 10.1016/j.rse.2005.05.009.

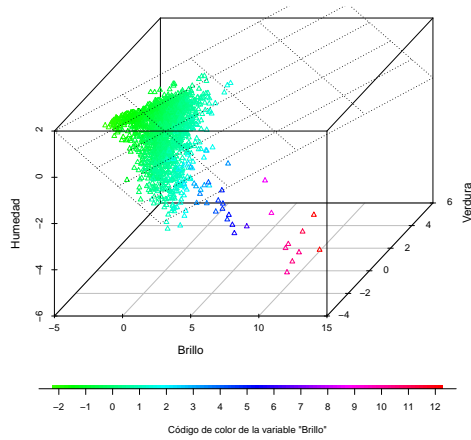
- Huang, C., B. Wylie, L. Yang, C. Homer y G. Zylstra (2002). Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance. En: *International Journal of Remote Sensing* 23 (8), 1741-1748. DOI: 10.1080/01431160110106113.
- Hucek, R. y H. Jacobowitz (1995). Impact of Scene Dependence on AVHRR Albedo Models. En: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 12 (4), 697-711. DOI: 10.1175/1520-0426(1995)012<0697:IOSDOA>2.0.CO;2. eprint: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0426\(1995\)012<0697:IOSDOA>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0426(1995)012<0697:IOSDOA>2.0.CO;2).
- INEC (2016). *Población total proyectada al 30 de junio por grupos de edades, según provincia, cantón, distrito y sexo*. Inf. téc. San José: INEC.
- Jacobson, Mark Z. y John E. Ten Hoeve (2012). Effects of urban surfaces and white roofs on global and regional climate. En: *Journal of Climate* 25 (3), 1028-1044. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00032.1.
- Kala, J., J. P. Evans, A. J. Pitman, C. B. Schaaf, M. Decker, C. Carouge, D. Mocko y Q. Sun (2014). Implementation of a soil albedo scheme in the CABLEv1.4b land surface model and evaluation against MODIS estimates over Australia. En: *Geoscientific Model Development* 7 (5), 2121-2140.
- Karlsson, K. G., A. Riihelä, R. Müller, J. F. Meirink, J. Sedlar, M. Stengel, M. Lockhoff, J. Trentmann, F. Kaspar, R. Hollmann y E. Wolters (2013). CLARA-A1: A cloud, albedo, and radiation dataset from 28 yr of global AVHRR data. En: *Atmospheric Chemistry and Physics* 13 (10), 5351-5367. DOI: 10.5194/acp-13-5351-2013.
- Kauth, R J y G S Thomas (1976). The tasselled cap - A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. En: *Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, West Lafayette, Indiana, U.S.A, 29 June-1 July 1976*, 41-51.
- Liang, S., Y. Yu y T. P. Defelice (2005). VIIRS narrowband to broadband land surface albedo conversion: formula and validation. En: *International Journal of Remote Sensing* 26 (5), 1019-1025.
- Liang, Shunlin, Chad J. Shuey, Andrew L. Russ, Hongliang Fang, Mingzhen Chen, Charles L. Walthall, Craig S.T. Daughtry y Raymond Hunt Jr. (2003). Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: II. Validation. En: *Remote Sensing of Environment* 84 (1), 25.
- Lillesand, T, R W Kieffer y J Chipman (2007). *Remote sensing and image interpretation*. 6.^a ed. New York: John Wiley y Sons.
- Loridan, Thomas y C. S B Grimmond (2012). Characterization of energy flux partitioning in urban environments: Links with surface seasonal properties. En: *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 51 (2), 219-241. DOI: 10.1175/JAMC-D-11-038.1.
- Ministerio del Ambiente Ecuador (2015). *Adaptación al Cambio Climático a través de una efectiva gobernabilidad del Agua en Ecuador - PACC*.
- Mišurec, Jan, Veronika Kopačková, Zuzana Lhotáková, Petya Campbell y Jana Albrechtová (2016). Detection of Spatio-Temporal Changes of Norway Spruce Forest Stands in Ore Mountains Using Landsat Time Series and Airborne Hyperspectral Imagery. En: *Remote Sensing* 8 (2), 1-20.
- Mora-Ramírez, Jorge (2006). *Plan Regional Metropolitano GAM*. Inf. téc. San José: Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU) - PRUGAM, p. 420.
- Morera, C. y L. Sandoval (2016). *Uso/coertura de la tierra de Costa Rica. Escala 1: 100.000*. Inf. téc. Proyecto de investigación 0116-14. Evaluación de procesos de fragmentación y conectividad de ecosistemas tropicales para Costa Rica: Caso nacional así como de la Península de Osa y Nicoya. Material Cartográfico. Heredia: ECG-UNA.
- Oke, T.R. (2002). *Boundary Layer Climates*. Ed. por Routledge. Taylor & Francis, p. 464.
- Riaño, David, Javier Salas y Emilio Chuvieco (2000). Corrección Atmosférica y Topográfica, Información Multitemporal y Auxiliar Aplicadas a la Cartografía de Modelos de Combustibles con Imágenes Landsat-TM. En: *Tecnologías geográficas para el desarrollo sostenible: IX Congreso del Grupo de Métodos Cuantitativos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección*, 222-239.
- Sellers, W.D. (1965). *Physical climatology*. Chicago: University of Chicago Press.
- Shunlin, Liang y Alan H. Strahler (1999). Retrieval of land surface albedo from satellite observations: A simulation study. En: *Journal of Applied Meteorology* 38 (6), 712.
- Silva, Bernardo B, Alexandra C Braga, Célia C Braga, Leidjane M M De Oliveira, Suzana M G L Montenegro y Bernardo Barbosa Junior (2016). daSilva_2016. En: *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 20 (1), 3-8. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v20n1p3-8.
- Strugnell, Nicholas C. y Wolfgang Lucht (2001). An Algorithm to Infer Continental-Scale Albedo from AVHRR Data, Land Cover Class, and Field Observations of Typical BRDFs. En: *Journal of Climate* 14 (7), 1360.
- Tasumi, M., R. Allen y R. Trezza (2008). At-Surface Reflectance and Albedo from Satellite for Operational Calculation of Land Surface Energy Balance. En: *Journal of Hydrologic Engineering* 13 (2), 51-63. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:2(51).

- Trishchenko, Alexander P., Luo Yi, Konstantin V. Khlopenkov y Wang Shusen (2008). A Method to Derive the Multispectral Surface Albedo Consistent with MODIS from Historical AVHRR and VGT Satellite Data. En: *Journal of Applied Meteorology & Climatology* 47 (4), 1199-1221.
- UNA (2013). *Foro: Cambio climático*. Heredia.
- U.S Geological Survey (2016). *LANDSAT 8 (L8) Data Users Handbook*. Inf. téc. Sioux Falls: Department of the Interior. U.S Geological Survey, p. 106.
- Wang, Dongdong, Shunlin Liang, Tao He y Yunyue Yu (2013). Direct estimation of land surface albedo from VIIRS data: Algorithm improvement and preliminary validation. En: *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 118 (22), 12577-12586. DOI: 10.1002/2013JD020417.
- Watson, Charles (2012). *Analysis of Urban Heat Island Climates along the I-85/I-40 Corridor in Central North Carolina (2012)*. Tesis doct.
- Wilcoxon, Frank (1945). Individual Comparisons by Ranking Methods. En: *Biometrics Bulletin* 1 (6), 80-83. DOI: 10.2307/3001968.
- Wyduck, J., P. Davies y A Gruber (1987). *Estimation of broadband planetary albedo from operational narrowband satellite measurements*. en. Inf. téc. NESDIS 27. NOAA, p. 32.
- Zhong, Q. e Y. Li (1988). Satellite Observation of Surface Albedo Over the Qinghai-Xizang Plateau Region. En: *Advances in Atmospheric Sciences* 5 (1), 57-64.
- Zhuo, Wang y Zeng Xubin (2010). Evaluation of Snow Albedo in Land Models for Weather and Climate Studies. En: *Journal of Applied Meteorology & Climatology* 49 (3), 363-380.

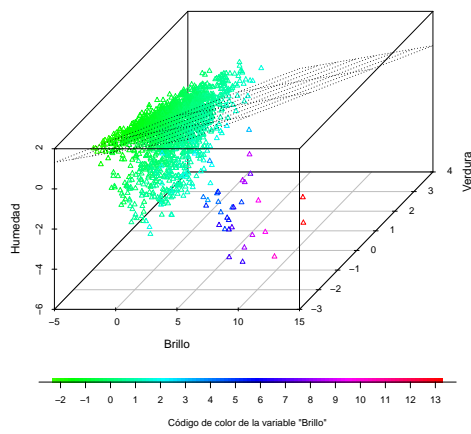
Anexo: Cálculos y gráficos complementarios

Remuestreo para cálculo de límites de confianza

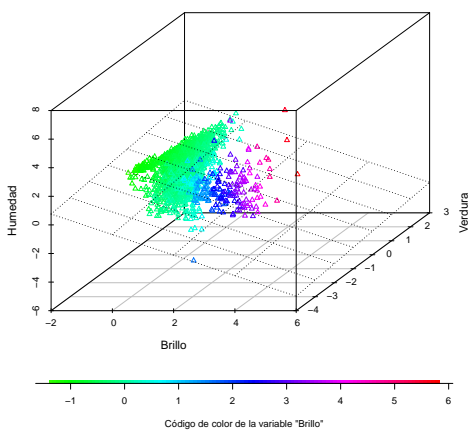
Figura 30: Gráficos de dispersión del proceso de Tasseled Cap normalizado con el plano de la regresión de transformación del DI. Solo se representan 1692 datos. El remuestro de 1692 datos fue calculado mediante un bootstrap de 99 permutaciones.



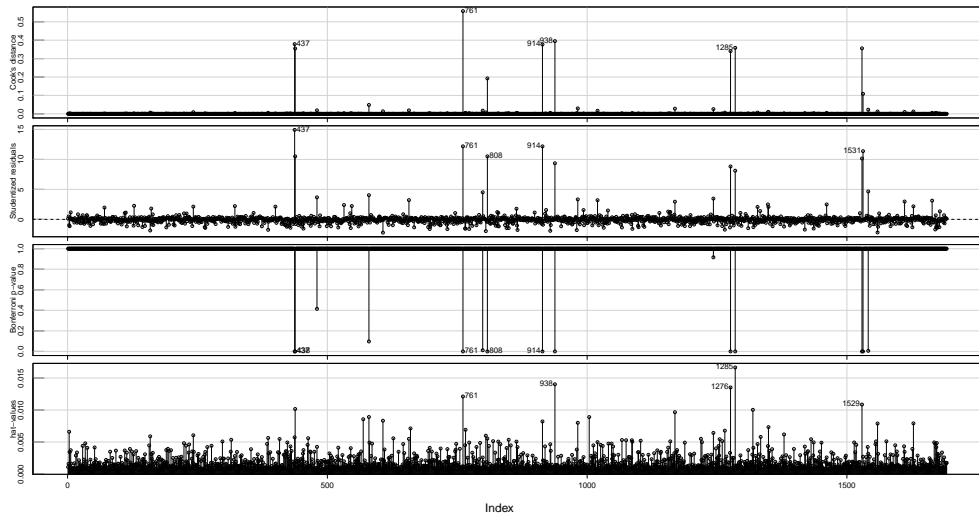
(a) GAM 1986. Gráfico de dispersión del Tasseled Cap: Brillo, Verdura, Humedad (suelo)



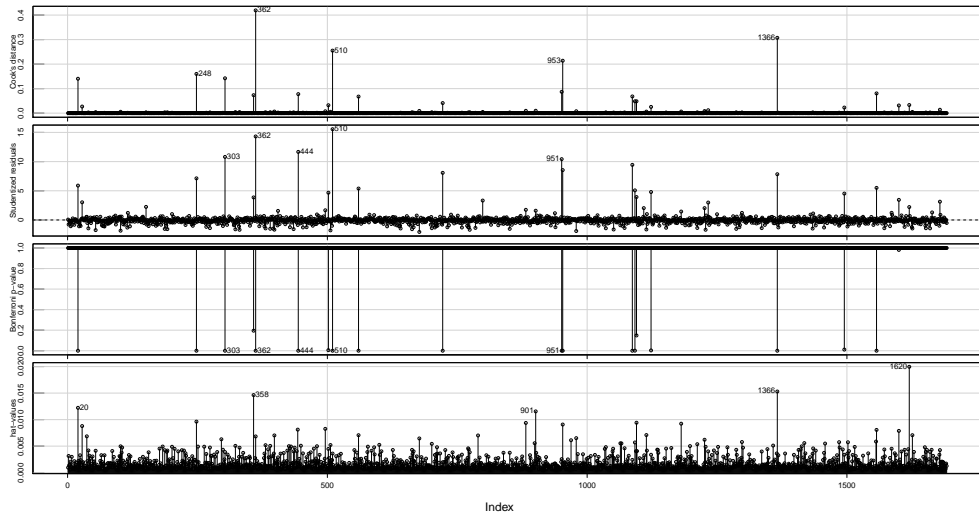
(b) GAM 2001. Gráfico de dispersión del Tasseled Cap: Brillo, Verdura, Humedad (suelo)



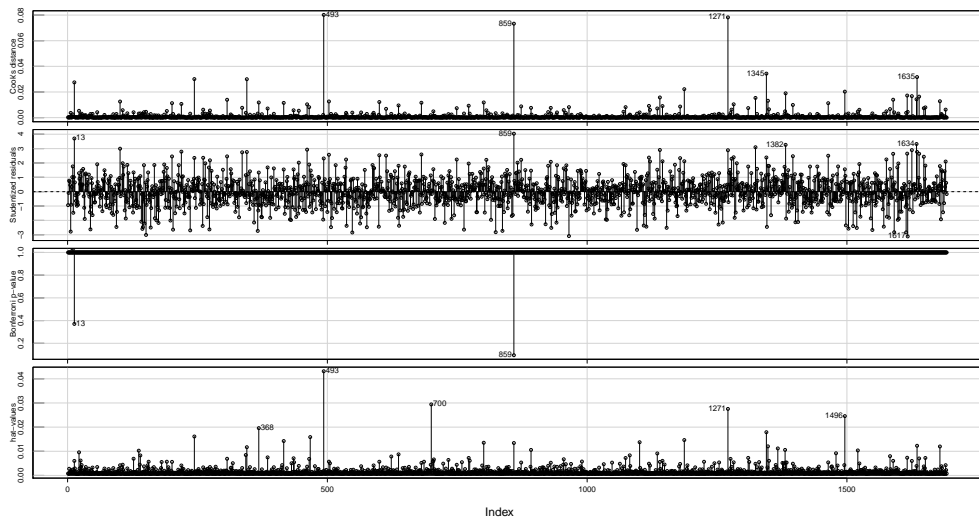
(c) GAM 2016. Gráfico de dispersión del Tasseled Cap: Brillo, Verdura, Humedad (suelo)



(a) 1986



(b) 2001



(c) 2016

Figura 31: GAM. Diagnóstico índices de influencias de residuos de la regresión lineal (Brillo Verdura + Humedad)