

Detección de cambios en los flujos de carbono de la selva amazónica (Perú) utilizando el producto MOD17A2 de MODIS

Marco Antonio Herrera-Díaz (1), Christian Ayala Jesus (1)

GEOTELEDETECCION SAC
marcohd1987@gmail.com

ESTERD CONSULTORES SAC
christian996971191@gmail.com

RESUMEN:

Las técnicas de detección de cambios permiten la identificación de diferencias en el estado de objetos o fenómenos a través del tiempo. En Teledetección esta operación involucra la capacidad de cuantificar los cambios ambientales usando datos de imágenes multitemporales o hipertemporales.

La selva amazónica, fuente de riqueza por variedad de especies en flora y fauna, tiene un problema fundamental ocasionado por la actividad antrópica que se encarga de alterar los medios de vida. Los bosques de la Amazonía poseen la particularidad de mantener el CO₂ estable en el planeta. A medida que la cubierta vegetal se altera, el CO₂ se libera aumentando el efecto invernadero de la atmósfera. Para entender y manejar estos cambios es indispensable contar con datos actualizados sobre los flujos de carbono con resolución temporal y espacial adecuadas. Por este motivo, en este trabajo se ha escogido el producto MOD17A2 versión 055, con una resolución temporal de 8 días y una resolución espacial de 1 km y con un sistema de referencia sinusoidal. Este producto proporciona la productividad primaria bruta (GPP), que cuantifica el flujo de carbono que la vegetación fija a través de la fotosíntesis.

En esta investigación se realizará una evaluación de la variabilidad de la GPP comprendida entre los periodos de enero del 2000 hasta diciembre del 2012, de manera mensual y anual para verificar cuándo se altera selva amazónica por la actividad antrópica. Se utilizará un software estadístico que nos permite analizar series temporales llamado "TIMESTATS"; esta aplicación contiene diferentes módulos para pre-procesar, realizar análisis básicos y de tendencias, regresión múltiple en forma lineal y no lineal, así como el análisis de las frecuencias; incluye también un proceso de limpieza que detecta y corrige los valores anómalos y filtros para eliminar el ruido en los datos; en el módulo de pre-procesamiento contiene opciones para generar compuestos, analizar anomalías, calcular estadísticas globales y estacionales, que nos ayudará en el procesado de las imágenes.

1. INTRODUCCIÓN

El Perú, ubicado al centro-oeste de América del Sur, con límite al Océano Pacífico, presenta parte de su territorio ocupado por la selva amazónica, que en los últimos años ha sufrido cambios debido a la deforestación sobre todo en las Regiones de Loreto, San Martín y Ucayali. El desarrollo forestal en el Perú es una tarea que no solo involucra al Gobierno a través de sus instituciones tutelares en el tema, sino también a la sociedad civil, desde las organizaciones comunales hasta los agentes no gubernamentales cuya preocupación real son los bosques. Las actividades extractivas mal conducidas incentivan aún más la degradación de los hábitats naturales. Si bien es cierto que la deforestación inevitablemente avanza y que, a su vez, disminuye la cobertura forestal, es necesario conocer cómo ha ido evolucionando en el tiempo (Ministerio del Ambiente et al., 2012).

La selva peruana, que comprende una diversidad de tipos de vegetación, está representada por los bosques tropicales, donde alternan innumerables especies de árboles con madera de diversa calidad o de resinas útiles así como de palmeras y plantas de Orquídeas. Algunas de las plantas presentes en la selva son muy valoradas debido a su comercialización en el mercado de madera para la elaboración de diversos muebles. La vegetación es un elemento muy importante en la biosfera terrestre y controla en parte los flujos de carbono que van hacia la atmósfera. La productividad primaria bruta (GPP) es un componente

muy importante del ciclo del carbono. Las imágenes de GPP nos permiten determinar la cantidad y la variación espacio-temporal de los flujos de carbono crucial en la toma de decisiones vinculadas con el cambio climático (Zhao et al., 2010).

Actualmente existen herramientas que permiten modelar y ordenar el territorio de acuerdo a sus potencialidades y debilidades. La Teledetección Espacial es una herramienta muy utilizada en muchas aplicaciones, una de ellas es la detección de cambios, observando el territorio desde un ángulo ventajosamente ubicado. Las variables que se pueden obtener son: Primarias (que son las que mide el sensor) y Secundarias (que son las derivadas de las primarias mediante una abstracción o conceptualización del usuario). Para realizar un estudio mediante la teledetección, es necesario definir los objetivos y evaluar las herramientas disponibles, buscando un equilibrio entre ambos (Chuvieco et al., 2010).

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) es un sensor de vigilancia ampliamente utilizado para obtener diversos tipos de parámetros ambientales de la superficie terrestre cubriendo campos muy variados como: reflectividad bruta y corregida, nubes, cobertura de nieve y del suelo, área foliar, productividad vegetal, índices de vegetación, incendios, etc. (Justice et al., 2002). Se encuentra a bordo del satélite EOS (Earth Observing System) de la NASA (National Aeronautics and Space Administration), que opera desde el año 2000. La

productividad primaria bruta (GPP) MOD17 A2 depende mucho de la radiación fotosintética activa (PAR) que es absorbida por la cubierta vegetal y de la eficiencia de conversión (ϵ), que tiene en cuenta la eficiencia del proceso fotosintético y que varía según el tipo de vegetación de la zona (Shum et al., 2014).

MODIS posee 36 bandas a distintas resoluciones y longitudes de ondas. Cuenta con un área de barrido de 2 300 km, lo que le facilita una cobertura diaria de la Tierra. Una de las novedades de este sensor es que tanto las imágenes originales como los productos derivados de ellas son accesibles libremente a través de internet. Los productos, además, se encuentran calibrados y están disponibles los algoritmos que se han empleado en su generación.

El Tile de la imagen MODIS con que se trabajará en este estudio comprende una escena del territorio peruano que contiene las principales regiones mencionadas anteriormente; con el producto MOD12Q1 se ayudó a determinar en el Tile de estudio el tipo de cubiertas vegetales que pertenecen a la zona para disponer de información auxiliar que permita un mejor análisis de los resultados.

El objetivo principal en esta investigación es determinar los cambios en los flujos de carbono para la selva amazónica de la parte norte del Perú mediante la utilización de series temporales de imágenes de GPP, con la finalidad de entender cómo han variado los flujos de carbono en el periodo del 2000 al 2012 y a la vez poder estudiar las anomalías que corresponden al periodo de estudio y detectar en qué zonas existe variación en la cobertura vegetal.

2. METODOLOGÍA

La zona de estudio se encuentra en la Amazonía peruana, en el tile H 10 y V 09 (figura 1). Dentro de esa cuadrícula se encuentra los departamentos de Loreto, Amazonas, San Martín, Huánuco y Ucayali. Estos cinco departamentos comprenden dos de las regiones naturales que se distinguen en Perú según la clasificación de Pulgar Vidal (1967). En la figura 2 se representa las 8 regiones naturales que comprende el Perú según dicho autor.

La búsqueda de las imágenes MODIS se pueden realizar por coordenadas, archivos vectoriales o seleccionando el área de interés, pero las descargas siempre serán por cuadrículas. Estas imágenes están disponibles y son accesibles de manera gratuita de las páginas <http://reverb.echo.nasa.gov/> y <http://glovis.usgs.gov/>, que pertenecen a la NASA y USGS respectivamente. Todos los datos de MODIS son procesados a partir del Level L1. Existen muchos productos estándar de datos MODIS que los científicos de una amplia variedad de disciplinas, incluyendo la oceanografía, biología y ciencias de la atmósfera (Faith et al., 2003; Bandaru et al., 2013), están utilizando para estudiar el cambio global.

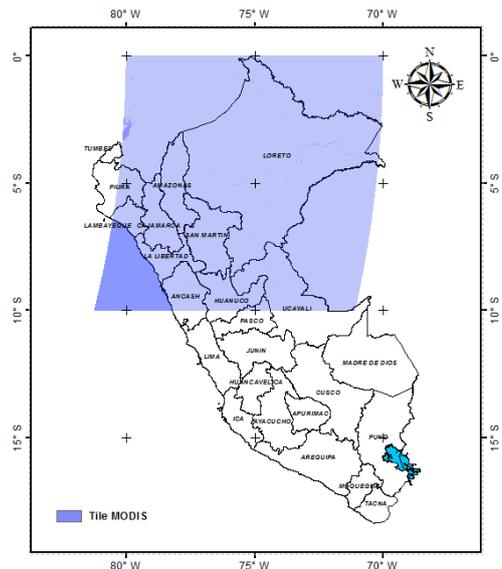


Figura 1. Zona de Estudio (Tile H10 y V09)

En relación con la productividad global, la NASA actualmente "produce una estimación mundial regular de la productividad primaria bruta (GPP) y la productividad primaria neta anual (NPP) de toda la superficie terrestre a 1 km de resolución espacial" (Running et al., 2000; Thornton et al., 2002).

En este estudio se utilizó el producto MOD17A2 que, como se ha mencionado anteriormente, se corresponde con la productividad primaria bruta (GPP). Este producto posee una resolución temporal de 8 días y una resolución espacial de 1 km. La tabla 2 proporciona una descripción del MOD17A2.

Tabla 1. Productos del MOD17A2

Conjunto de Datos (HDF Layers) (3)	Unidad	Tipo de BIT	Rango de FILL	Rango a Valida.	Factor De Escala
Gpp_1km:		16-bit			
Gross Primary Production	kg/m ²	signed integer	32761–32767	0–30000	0.0001
2.- PsnNet_1km:					
Net Photosynthesis (GPP – maintenance respiration)	kg/m ²	16-bit signed integer	32761–32767	-30000–30000	0.0001
3.- PSN_QC_1km:		8-bit			
QC for GPP/PSN	Bit	unsigned integer	255	0-254	NA

Fuente: Faith et al. (2003)

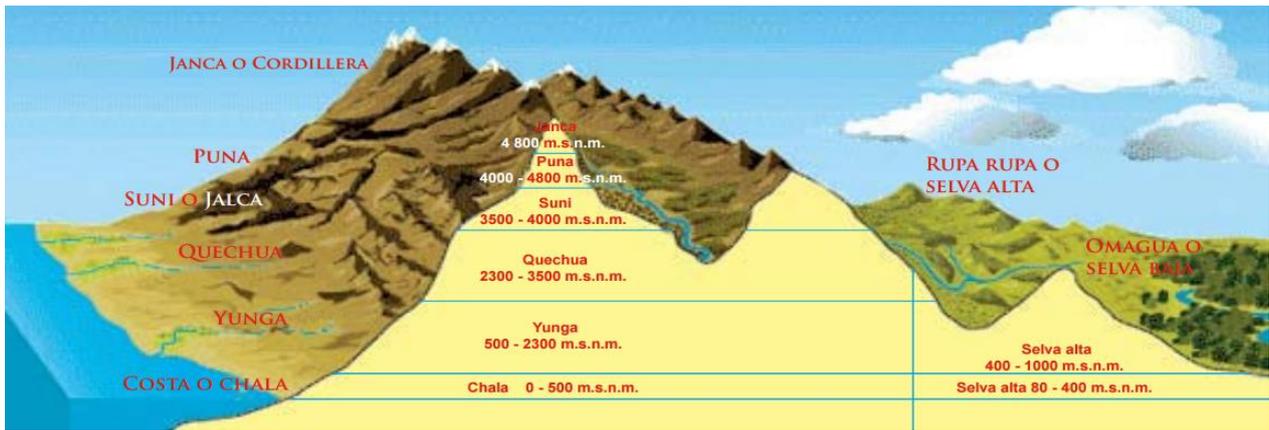


Figura 2. Regiones Naturales del Perú.
(Fuente: Pulgar Vidal (1967))

La zona de estudio se encuentra en la Amazonía peruana, en el tile H 10 y V 09 (figura 1). Dentro de esa cuadrícula se encuentra los departamentos de Loreto, Amazonas, San Martín, Huánuco y Ucayali. Estos cinco departamentos comprenden dos de las regiones naturales que se distinguen en Perú según la clasificación de Pulgar Vidal (1967). En la figura 2 se representa las 8 regiones naturales que comprende el Perú según dicho autor.

El más importante de los productos y con el que se trabajó es el Gpp_{1km} . Este producto se basa en el modelo de Monteith (1972). La GPP se calcula como se indica en la siguiente ecuación:

$$GPP = \epsilon_{max} \times m(T_{min}) \times m(VPD) \times f_{APAR} \times SW_{rad} \times 0.45$$

Donde ϵ_{max} es la eficiencia máxima para la luz, los multiplicadores $m(T_{min})$ y $m(VPD)$ reducen ϵ_{max} en condiciones desfavorables de baja temperatura y alto déficit de presión de vapor VPD, respectivamente. f_{APAR} es la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida, y SW_{rad} es la radiación solar de onda corta incidente. La PAR incidente (IPAR, radiación incidente entre 0.4 y 0.7 μm) en la superficie vegetativa es el 45% de la SW_{rad} , calculada con el conjunto de datos de la Oficina de Asimilación de Datos (DAO)) (Chen et al., 2014).

En la siguiente figura 3 podemos visualizar cómo se obtiene la productividad primaria bruta a partir de las variables del modelo.

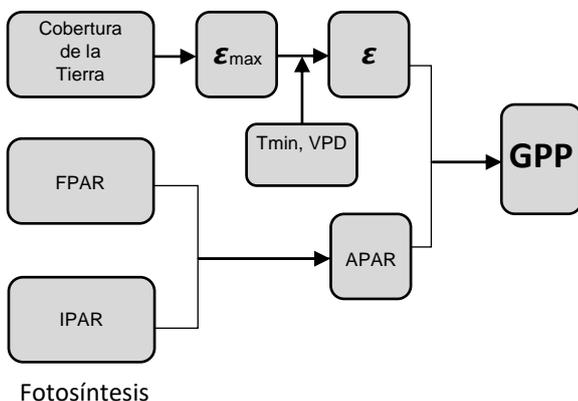


Figura 3. Esquema de la obtención de la GPP
(Fuente: Faith et al., 2003).

ϵ es la eficiencia en el uso de la radiación. Se obtiene a través del producto MOD12, que nos brinda información de la cobertura de la tierra y varía de acuerdo a los diferentes tipos de vegetación (Field et al., 1995; Prince y Goward 1985). La f_{APAR} se obtiene del producto MOD15, que a su vez contiene productos del LAI (índice de superficie foliar).

Tabla 2. Parámetros BPLUT para la productividad primaria bruta diaria

Parámetros	Unidades	Descripción
ϵ_{max}	(kg MJ ⁻¹)	La máxima eficiencia de conversión de la radiación
T_{MINmax}	(°C)	La temperatura mínima diaria en la que $\epsilon = \epsilon_{max}$ (VPD óptimo)
T_{MINmin}	(°C)	La temperatura mínima diaria en la que $\epsilon = 0.0$ (cualquier VPD)
VPD_{max}	(Pa)	El déficit de presión de vapor en el que $\epsilon = \epsilon_{max}$ (T_{MIN} óptimo)
VPD_{min}	(Pa)	El déficit de presión de vapor en el que $\epsilon = 0.0$ (cualquier T_{MIN})

Fuente: Faith et al., 2003

Para MOD17, VPD es la única variable directamente relacionada con el estrés hídrico ambiental.

Para la detección de cambios de la GPP a partir de series temporales de imágenes de satélite mensuales se propone la siguiente metodología, basada en una secuencia de etapas. Para llevarlas a cabo, se ha utilizado el TIMESTATS, este software estadístico nos permitió obtener algunos mapas para poder determinar la tendencia de las zonas de muestra y así poder comprobar los cambios ocurridos en el periodo de estudio, a su vez se tomaron mapas del Ministerio del ambiente del Perú para poder realizar las comprobaciones de los cambios ocurridos en dicho periodo.

Tabla 3. Coordenadas de los píxeles evaluados

Latitud	Longitud	Tipo de Cobertura (MOD12Q1)	Departamento
-5.142	-78.349	Bosques de hoja perenne de hoja ancha	Amazonas
-4.233	-73.350	Humedales permanentes	Loreto
-3.267	-74.689	Bosques de hoja perenne de hoja ancha	Loreto
-7.208	-76.706	Tierras de Cultivo	San Martín
-8.808	-74.124	Tierras de Cultivo	Ucayali

El análisis de los resultados obtenidos se realizó por un determinado proceso en el TIMESTATS, que se desarrolla en dos etapas. Primero, se comparan los píxeles de referencia y se define su comportamiento en el tiempo. Luego, se analizan los mapas estadísticos y de tendencias.

En los mapas de tendencias se trabajó con el promedio estacional anual. Se calculó el P-value y el test de Mann Kendal, con ambos se generaron una máscara en donde los valores se encuentran al 90% de significancia ($P\text{-value} < 0.1$, en valor absoluto), estos valores de significancia fueron superpuestos en los mapas de pendiente y en pendiente de Mann Kendal respectivamente, para ver los valores que son significativos. El resto de valores se rechazaron. En la Figura 4 se muestra el diagrama general de la metodología de detección de cambios.

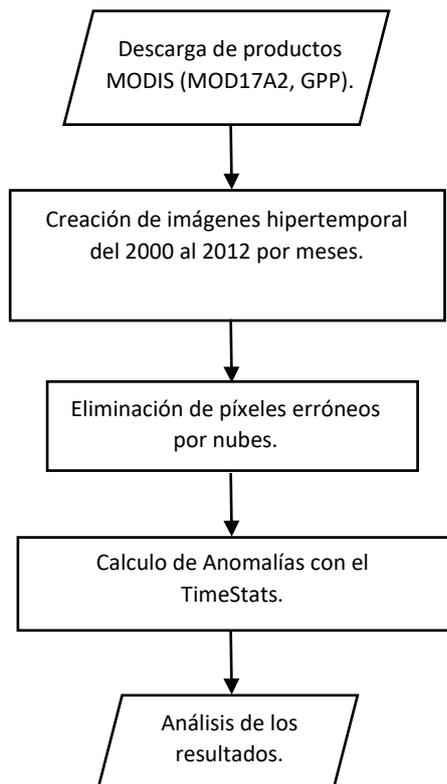


Figura 4. Resumen de la metodología empleada.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se van a exponer los resultados con la metodología explicada anteriormente. Esto se divide en tres partes: perfiles hipertemporales, mapas estadísticos y mapas de tendencias.

3.1. PERFILES HIPERTEMPORALES

Como se observa a continuación, en los perfiles podemos determinar las variaciones que han ocurrido en el periodo de estudio. En este apartado se verán, a modo de ejemplo, algunos perfiles en donde la variación es muy alta o muy baja.

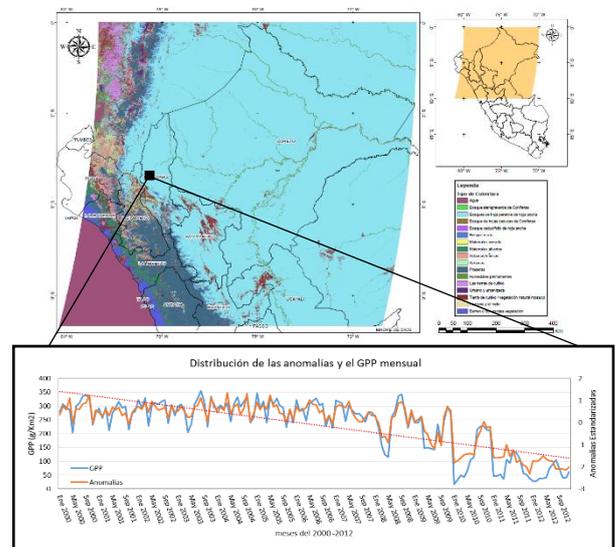


Figura 5. Píxel 237, 618. Departamento de Amazonas (Lat. S -5.145; Lon. W -78.349).

Según la clasificación del MOD12Q1, el píxel de la fig. 5 pertenece a la clase “bosque de hoja perenne y de hoja ancha”. En el mapa de cobertura vegetal realizado por el Ministerio del Ambiente de Perú se encuentra clasificado como “zona deforestada en colina y montaña”. Según los informes realizado por el Ministerio del Ambiente, esta zona se encontraba deforestada antes del 2000 y según el mapa climático del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) el píxel se encuentra en zona “muy lluviosa, cálida y muy húmeda, con verano seco”. Las variaciones de GPP se encuentran con estacionalidad hasta mayo del 2008 donde desciende debido a que en ese periodo la temperatura y la precipitación suelen disminuir la actividad fotosintética. En el mes de enero del 2010 se presenta una caída que llega a casi cero, esto es debido a que el río Marañón se desbordó inundando esa zona. El 80 % de las precipitaciones suelen ocurrir de noviembre a abril, es por ende que en este periodo suele haber inundaciones.

Los valores negativos de las anomalías muestran pérdida de vegetación por las inundaciones. En este

periodo se quedó prácticamente cubierta de agua la vegetación, por las altas precipitaciones.

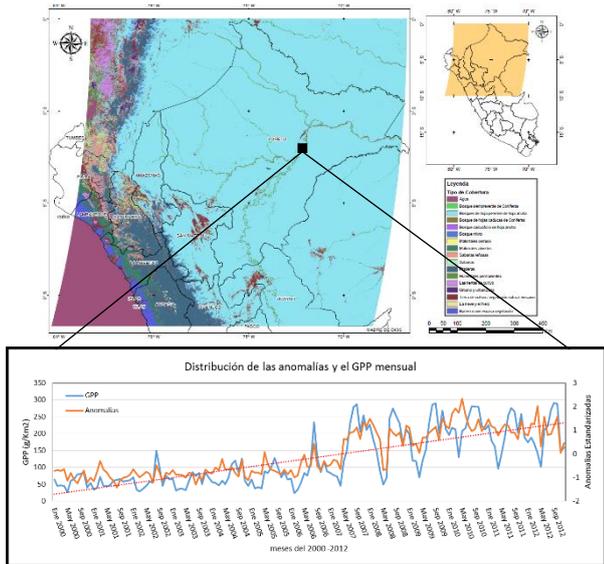


Figura 6. Píxel 823, 509. Departamento de Loreto (Lat. S -4.233; Lon. W -73.350).

Según la clasificación del MOD12Q1, el píxel de la fig. 6 pertenece a la clase “humedales permanentes”. En el mapa de cobertura vegetal realizado por el Ministerio del Ambiente de Perú se encuentra clasificado como “bosque húmedo de superficie plana inclinada”, según los informes realizado por el Ministerio del Ambiente, esta zona se encontraba deforestada antes del año 2000. La GPP muestra una tendencia creciente debido a que en los años del 2000 al 2007, la zona estaba cubierta de agua debido a la tala que hubo en los años anteriores al 2000 y fue inundada por las altas precipitaciones y el río Amazonas. A finales del 2007 las anomalías muestran que existe un aumento de GPP que se relaciona con el crecimiento natural de la vegetación con caídas en los meses de mayo en los años restantes, debido a que en este mes las precipitaciones suelen bordear los 300 mm. (Fuente: Datos del servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI))

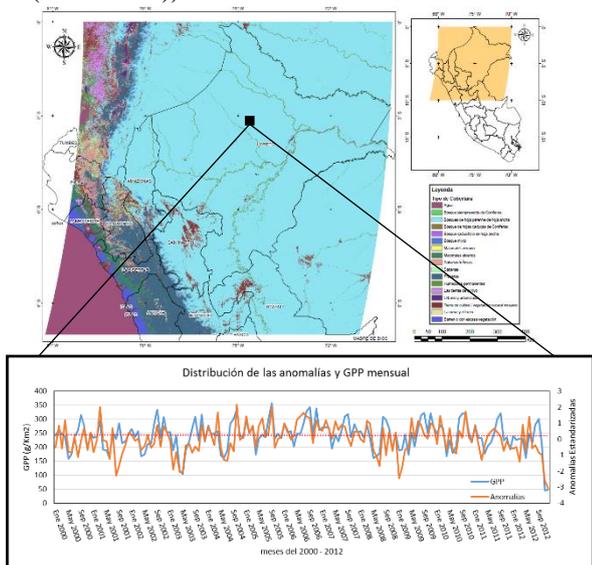


Figura 7. Píxel 653, 393. Departamento de Loreto (Lat. S -3.267; Lon. W -74.689).

Según la clasificación del MOD12Q1, el píxel de la fig. 7 pertenece a la clase “bosques de hoja perenne de hoja ancha”. En el mapa de cobertura vegetal realizado por el Ministerio del Ambiente de Perú se encuentra clasificado como “bosque húmedo de colina baja y lomada”. En la serie temporal se observa estabilidad, por lo mismo que es una zona donde no existe actividad humana, donde la actividad maderable no es favorable debido a las colinas que poseen fuertes pendientes. Las anomalías y la GPP muestran caídas en los meses de Julio del 2001 debido a que hubo un descenso de temperatura de 9 °C, que no es muy frecuente en la zona. En julio y agosto se muestra que la GPP y las precipitaciones promueven

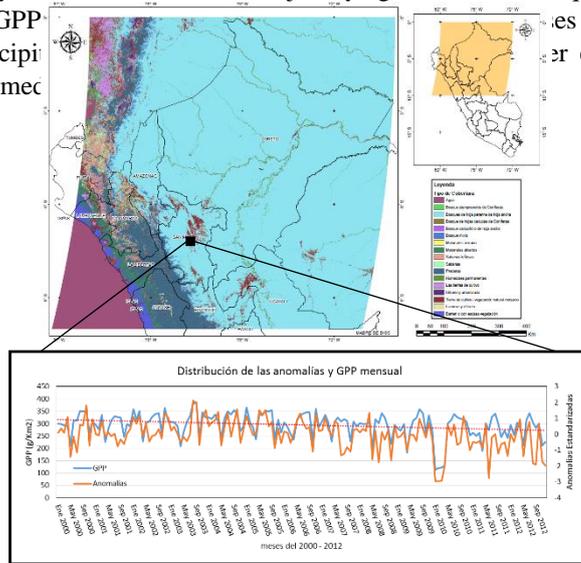
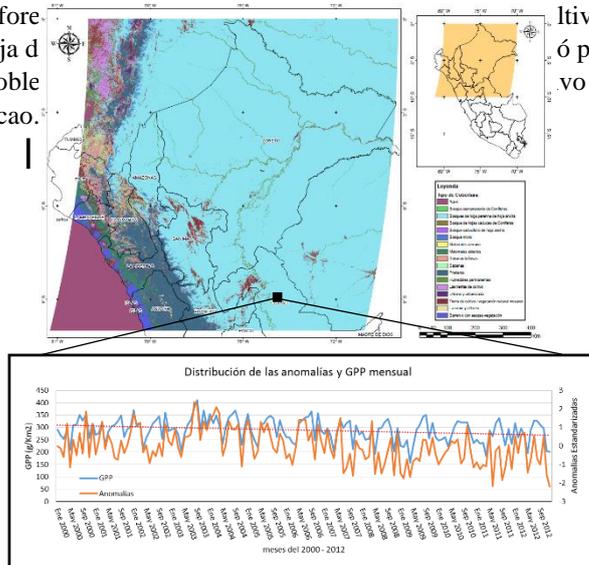


Figura 8. Píxel 469, 866. Departamento de San Martín (Lat. S -7.208; Lon. W -76.706).

Según la clasificación del MOD12Q1, el píxel de la fig. 8 pertenece a la clase “tierras de cultivo”. En el mapa de cobertura vegetal realizado por el Ministerio del Ambiente de Perú se encuentra clasificado como “área deforestada en colina y montaña”. La zona se encontraba deforestada por la actividad agrícola, cultivar hoja de cacao ó por el cultivo de cacao.



ltivar
ó por
vo a

Figura 9. Píxel 811, 1058. Departamento de Ucayali (Lat. S -8.808; Lon. W -74.124).

El píxel que se muestra en la figura 9 pertenece, según la clasificación del MOD12Q1, a la clase “tierras de cultivo”. En el mapa de cobertura vegetal realizado por el Ministerio del Ambiente de Perú se encuentra clasificado como “herbazal hidrofítico”, este tipo de vegetación se inunda por un largo periodo del año y que, al descender el nivel de inundación, aflora un denso tapiz herbáceo de porte bajo que cubre el suelo en su totalidad, esto suele suceder en los meses de junio a septiembre. La GPP presenta un comportamiento estable durante el periodo de estudio, pero en los meses de junio a septiembre aumenta debido a que las precipitaciones son bajas y aflora la vegetación. La precipitación en la zona varía de 50 mm al mes en los meses mencionados, mientras que en los meses restantes suele llegar hasta 180 mm al mes.

3.2. MAPAS ESTADÍSTICOS

El mapa de coeficiente de variación de la fig. 10 nos muestra la variación existente en la GPP. Se ha calculado de la relación de la desviación estándar sobre los valores de la media. A mayor valor del coeficiente de variación existe mayor heterogeneidad de los valores de la GPP; y a menor valor del coeficiente de variación existe mayor homogeneidad de los valores de la GPP. Los valores que se encuentran cerca de cero indican que existe mayor homogeneidad de la GPP, como se muestra en el departamento de Loreto y Ucayali; son zonas donde no existe actividad humana y están conformadas por áreas naturales protegidas.

La parte más alta es el límite de la costa con la sierra. Aquí se registra una mayor variabilidad debido a la localización de algunos nevados en la parte central, entre Ancash y La Libertad.

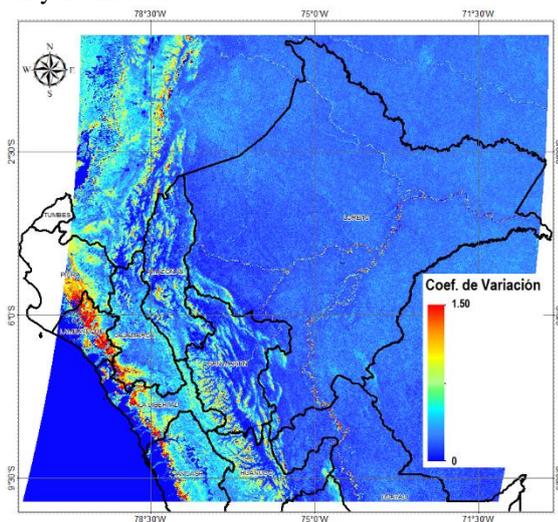


Figura 10. Mapa de Coeficiente de Variación de la GPP

En la fig. 11 se muestra el mapa de medias, donde se observa que los píxeles con mayor valor de GPP se encuentran en la zona de la selva amazónica, que por lo general son zonas boscosas. Los valores más bajos de GPP

se localizan en la costa, donde se ubican en mayor proporción las zonas urbanas y el océano que toma valor nulo. Alrededor del río Amazonas existen zonas de humedales con valores bajos de GPP, lo que se observa en el píxel ubicado en Loreto (véase figura 11).

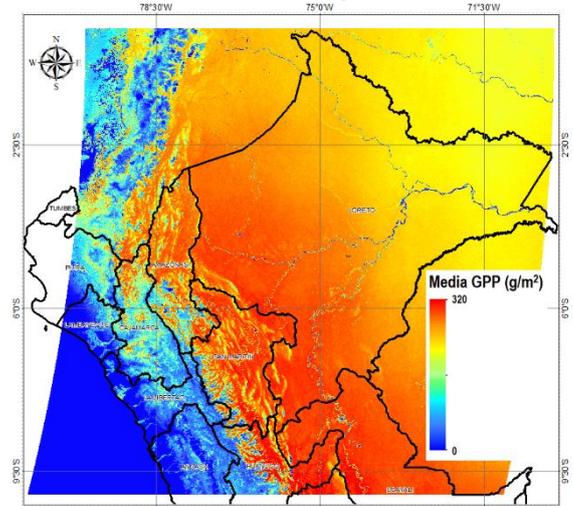


Figura 11. Mapa de Media GPP

3.3. MAPAS DE TENDENCIAS

A continuación, se muestran diversos mapas con estadísticos relevantes para estudiar la tendencia.

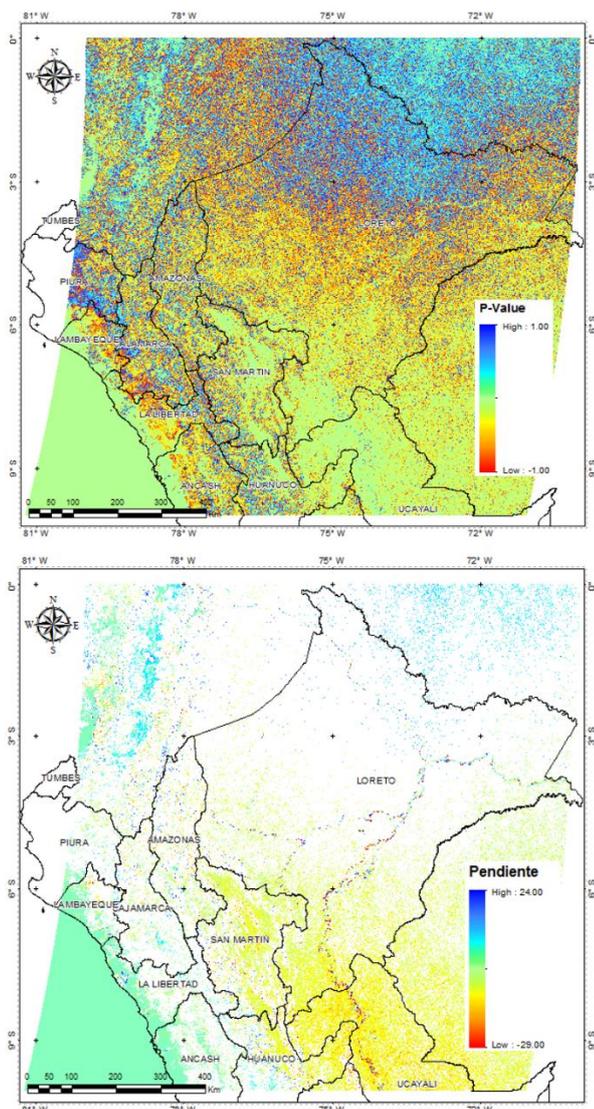


Figura 12. Valores de p-value (arriba) y Mapa de pendiente (abajo).

A partir de los valores de las imágenes de P-value se construyó una máscara que muestra los estadísticos calculados con un 90% de confianza.

El mapa pendiente de la GPP, que se encuentra en la parte inferior de la figura 12, nos indica la tendencia del crecimiento o decrecimiento de la vegetación. Los valores menores a cero o de pendiente negativa muestran valores donde la GPP ha disminuido debido a diversos factores como deforestación, cultivos, etc. Si se compara con el mapa de cobertura vegetal del Ministerio del Ambiente, se observa que los valores con tonalidades rojas, que a su vez son los valores negativos, tienen la misma estructura que las zonas donde existió un cambio de cobertura; los valores positivos muestran que hubo un aumento de la GPP en el periodo estudiado vinculado a un aumento de vegetación.

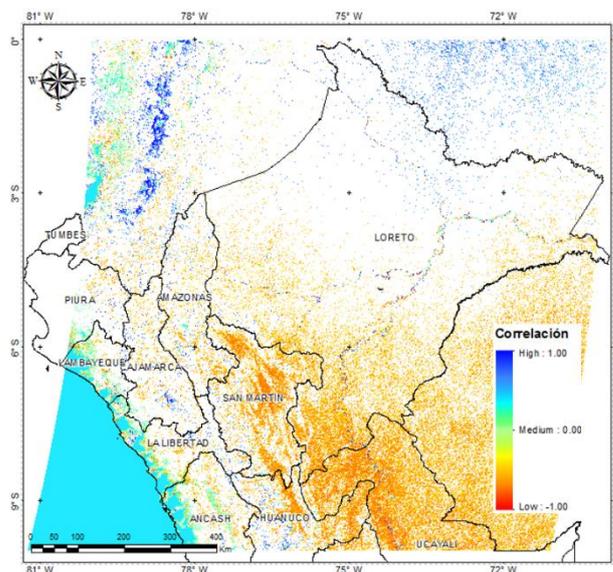


Figura 13. Mapa de Correlación.

El mapa de correlación de la figura 13 nos muestra la tendencia de la GPP. En las zonas de color anaranjado (donde la correlación es negativa hasta -0.99) nos representa las zonas donde la cobertura vegetal ha disminuido, comparando estas zonas con el mapa de cambio de bosque a no bosque, nos indica la tendencia si es ascendente o descendente y que dichas zonas son similares a las zonas donde los mapas muestran como deforestada. Las zonas donde existe un aumento de vegetación son zonas donde la actividad humana no se encuentra presente lo que se conoce como selva virgen, que se ubica sobre todo en Loreto, parte de San Martín, Amazonas y Huánuco. El departamento de Ucayali y en la parte sur de Loreto, se muestra un cambio de cobertura que es similar al mapa de cambio de cobertura que se realizó hasta el 2009, después de ese periodo los resultados arrojan que en el 2010 y 2012 hubo un cambio de cobertura en el resto de ambos departamentos.

El test de Mann Kendal al igual que el p-value, nos indica la significancia de los valores que se toman como significativos. En este mapa podemos observar que tiene similitud con los del p-value, los valores son parecidos y el rango de significancia es de -0.1 hasta $+0.1$ que viene a ser el 90 % de confianza. Los valores que se encuentran dentro de este rango se enmascararon para poder interpretar el mapa de pendiente de Mann Kendal que se muestra en la parte inferior. El mapa de la figura 14 de la pendiente de Mann Kendal, nos muestra la tendencia ascendente y descendente. En los departamentos de Ucayali, San Martín, Huánuco la tendencia es descendente debido a que en esas zonas existió cambio de cobertura vegetal entre el 2000 al 2009 como indica en el mapa del Ministerio del Ambiente. En el departamento de Ucayali y en el de Loreto se puede observar en el periodo comprendido entre el 2010 y 2012 existió un cambio de cobertura que nos muestra valores de pendiente negativos donde el valor de la GPP en la tendencia suele disminuir.

significancia. Cabe resaltar que la pendiente obtenida mediante el p-value nos representa un modelo de regresión lineal, a diferencia de la pendiente obtenida por el Test de Mann-Kendal que nos permite considerar modelos de tendencias no lineal.

Durante el periodo 2000 al 2009 los mapas de cambio de cobertura muestran áreas que se asemejan mucho a los mapas de pendientes. Como aportación de este trabajo, en el periodo 2010 al 2012, el departamento de Ucayali presenta una gran cantidad de píxeles con tendencias negativas que no se encuentran en los mapas de cambio de cobertura, dado que son bastantes recientes y dichos mapas todavía no han sido actualizados. Así pues, este tipo de técnicas permitiría una actualización de estos mapas sin necesidad de costosas campañas de campo o el uso de fotointerpretadores.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Bandaru, V., West, T. O., Ricciuto, D. M., and César Izaurralde, R., 2003. Estimating crop net primary production using national inventory data and MODIS-derived parameters, *ISPRS J. Photogramm.*, 80, 61–71.
- Chen, T., Van Der Werf, G. R., Gobron, N., Moors, E. J., Dolman, A. J., 2014. Global cropland monthly gross primary production in the year 2000. *Biogeosciences*, 11, 3871–3880.
- Faith, A. H., Reeves, M., Votava, P., Kang, s., Milesi, C., Zhao, M., Glassy, J., Jolly, W. M., Loehman, R., Bowker, Ch., Kimball, J., Nemani, R., Running, S., 2003. User's Guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products NASA MODIS Land Algorithm, 1, 8 – 35.
- Field, C. B., Randerson, J. T., Malmstrom, C. M., 1995. Global Net Primary Production – combining ecology and remote sensing, *Remote Sensing of the Environment*, 51, 74–88.
- Chuvieco E., 2010. Teledetección Ambiental – La Observación de la Tierra desde el Espacio, 1era Edición, Ariel, 608 pp.
- Justice, C. O., Townshend, J. R. G., Vermote, E., Masuoka, E., Wolfe, R., Saleous, N., Roy, D., & Morisette, J., 2002. An overview of MODIS land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, 83, 3–15.
- Maldonado, F.D., Santos, J.R., Carvalho, V. C., 2002. Land use dynamics in the semiarid región of brazil: characterization by principal components analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 5005–5013.
- Ministerio del Ambiente, 2012, Memoria Descriptiva: Mapa de Cobertura Vegetal del Perú, 3, 21 – 55.
- Prince, S. D., Goward, S. N., 1995. Global primary production: A remote sensing approach, *J. Biogeogr.*, 22, 815–835.
- Pulgar Vidal, J., 1967. Geografía del Perú: Las ocho regiones naturales. Editorial Ausonia. Lima.
- Running, S.W., Thornton P. E., Nemani, R., Glassy, J.M., 2000. Global terrestrial gross and net primary productivity from the Earth Observing System, *Methods in Ecosystem Science*, 44–57.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Datos disponibles en: <http://www.senamhi.gob.pe/>
- Shum Ch., Hong J., Hong J., Kim Y., Kang M., Malla B., Kim Y., Chun J., 2014. Evaluation of MODIS GPP over a complex ecosystem in East Asia: A case study at Gwangneung flux tower in Korea, *Advances in Space Research*, 54, 2296–2308.
- Thornton, P.E., Law B.E., 2002. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests, *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 185–222.
- Zhao M., Running S.W., 2010. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009, *Science*, 329, 940–943.