

**Mapa de tipos estructurales de
la Amazonia occidental, frecuencias de inundación
y cambios de cobertura de vegetación:
10 años de línea base para el estudio
del bioma amazónico**



**Mapa de tipos estructurales de
la Amazonia occidental, frecuencias de inundación
y cambios de cobertura de vegetación:
10 años de línea base para el estudio
del bioma amazónico**

Mapa de tipos estructurales de la Amazonia occidental, frecuencias de inundación y cambios de cobertura de vegetación: 10 años de línea base para el estudio del bioma amazónico.

Autores: Marcela Quiñones, Martin Vissers, Santiago Palacios, Brian Hettler, Juan Ricardo Mancera.

Cítese como: Quiñones, M.J; Vissers, M.; Palacios, S.; Hettler, B.; Mancera, J.R. Mapa de tipos estructurales de la Amazonia occidental, frecuencias de inundación y cambios de cobertura de vegetación: 10 años de Línea base para el estudio del Bioma amazónico. Publicación Amazon Conservation Team- SarVision, 2019.

Diseño y diagramación: Álvaro David Gil.

Impresión: Printer Full Color, Bogotá, diciembre de 2019.



Contenido

7 Introducción

- 7 Marco de referencia
- 8 Antecedentes
- 10 Lo que presentamos
- 11 La intención
- 14 Localización
- 15 Clima
- 16 Geología
- 18 Geoformas
- 20 Aspectos hidrológicos e inundaciones
- 22 Los suelos
- 24 La vegetación

27 Metodología y tecnología usada

- 27 Insumos
- 29 Procesamiento
- 30 Metodología y marco conceptual en el mapeo de la vegetación y desarrollo de la leyenda del mapa de tipos estructurales
- 32 Validación del mapa de estructuras de vegetación

39 Resultados

- 39 Los mapas
- 40 Mapa de frecuencias de inundación
- 45 Mapa de tipos estructurales de vegetación
- 48 Mapa de cambio de cobertura
- 51 La sinergia de los mapas - Los ecosistemas
- 62 La validación
- 65 El uso del mapa
- 68 El futuro de los ejercicios de mapeo y el monitoreo a largo plazo: Apoyo a los Parques Nacionales Naturales y a las comunidades indígenas
- 72 Referencias

Resumen:

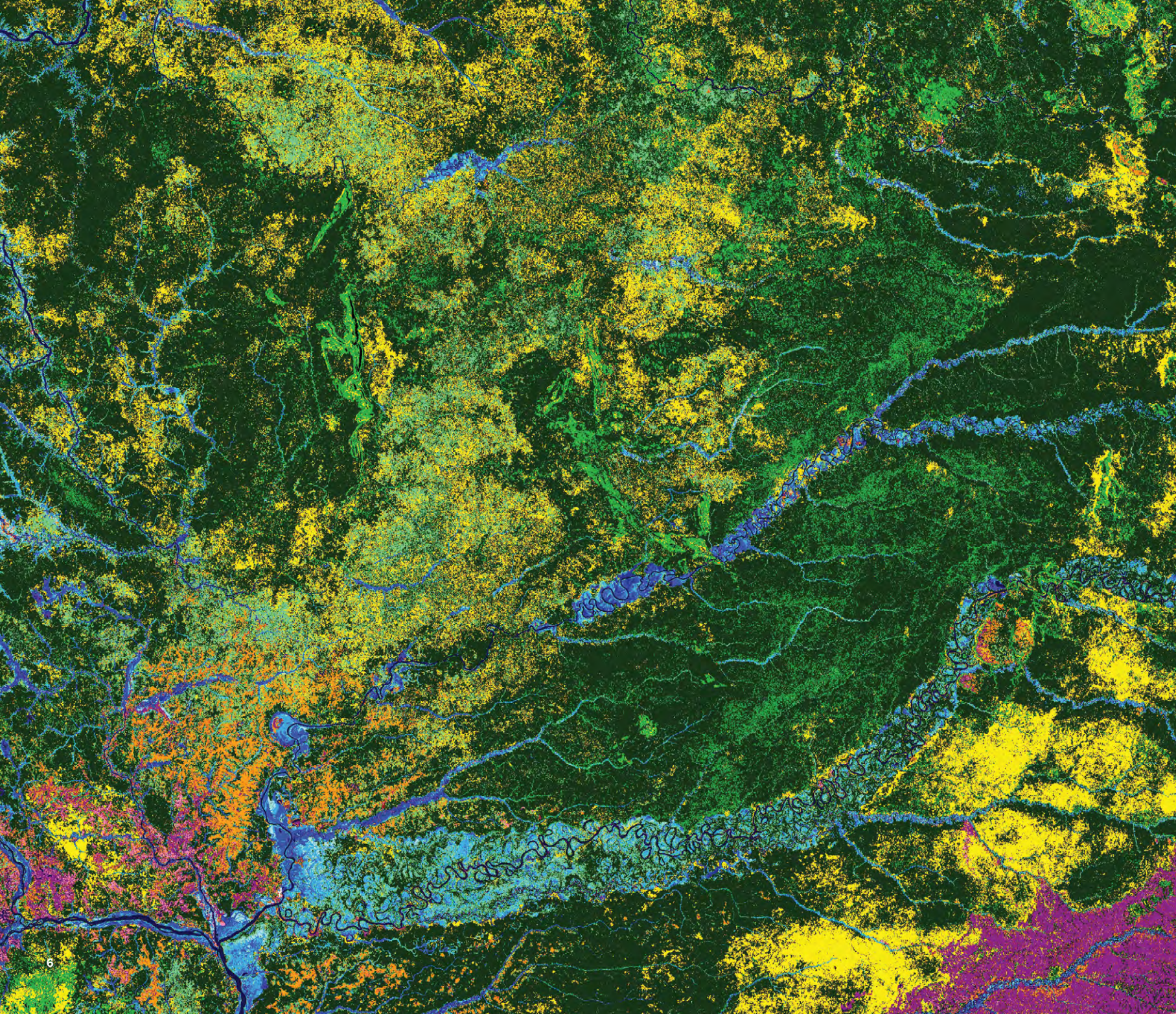
Este documento acompaña una serie de tres mapas que presentamos como una línea base para el estudio del bioma amazónico occidental: 1) En primer lugar presentamos un mapa de tipos estructurales de la Amazonia occidental; 2) El segundo mapa tiene análisis de frecuencias de inundaciones ocurridas en diez años (2007-2017), y 3) Tercero, presentamos un mapa con los cambios de cobertura de vegetación para el mismo período. Estos mapas fueron realizados en el marco de una beca MacArthur para el desarrollo de conocimiento sobre la Amazonia andina, trabajo realizado por SarVision, Amazon Conservation Team (ACT) y Amazon Conservation (AC). Los mapas están basados en el análisis de imágenes de radar Alos PALSAR-2 e imágenes de satélite LandSAT, la resolución es de 25m y se pueden trabajar a una escala 1:75.000, para estudios de tipo regional. La leyenda del mapa de vegetación estructural integra información de inundaciones y estructuras de vegetación, para seguir la metodología de clasificación de LCCS de la FAO. El análisis del mapa de frecuencias de inundación muestra que el 10 % del área estudiada (330.802.64 km²) se inunda con diferentes frecuencias. Con respecto a la estructura de la vegetación se observó que el bosque alto en planicies amazónicas cubre

entre el 30 % y el 50 % en cada país (Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia y Brasil) y el bosque bajo o degradado cubre entre el 11 % y el 20 % del territorio por país. Adicionalmente se detectaron ecosistemas especiales, tales como las varzeas amazónicas, las campinaranas o bosque en arenas blancas y las arboladas amazónicas, que en las regiones septentrionales representan al bosque seco. Con respecto al cambio de cobertura de vegetación, se observó que los países donde ocurrió más deforestación fueron Brasil y Bolivia. Al integrar los mapas de estructuras de vegetación y frecuencias de inundación, nos acercamos más a un mapa de unidades ecológicas en las que la estructura y cualidades del bosque están relacionadas con la frecuencia de inundación y el drenaje del suelo. También se presentan perfiles de vegetación que ilustran la estructura de estas unidades. Nuestros esfuerzos seguirán enfocados en el apoyo a las Unidades de Parques Nacionales y a las comunidades indígenas locales, para el monitoreo permanente del territorio. Se prevé la instalación de un sistema de monitoreo permanente basado en análisis de series de tiempo de imágenes de radar SENTINEL-1 para la detección de deforestación y degradación.

Abstract:

This document accompanies a series of three maps that we present as a baseline for the study of the western Amazon biome. First, we present a map of structural types of the western Amazon; second, we present a map with an analysis of flood frequencies over a ten-year period (2007-2017); and third, we present a map showing the changes in vegetation cover for the same period. These maps were made within the framework of a MacArthur Foundation grant for advancing knowledge about the Andean Amazon, work carried out by SarVision, the Amazon Conservation Team (ACT) and Amazon Conservation (AC). The maps are based on an analysis of ALOS PALSAR-2 radar images and LandSAT satellite images. The resolution is 25m, and the maps can be applied at a scale of 1:75,000 for regional studies. The legend of the structural vegetation map integrates information on floods and vegetation structures, aligning with the FAO LCCS classification methodology. The flood frequency map analysis shows that 10% of the studied area (330,802.64 km²) is flooded at different frequencies. With respect to the structure of the vegetation, it was observed that the elevated forest in the Amazonian plains covers between 30% and 50% of the examined

area in each country (Colombia, Ecuador, Peru, Bolivia and Brazil), and that the lowland or degraded forest covers between 11% and 20% of this area by country. In addition, special ecosystems were detected, such as Amazonian varzeas, campinaras (Amazonian vegetation that grows over leached white sand), and Amazonian woodlands, which in the northern regions are representative of the dry forest. With respect to the change in vegetation cover, it was observed that the countries where the most deforestation occurred were Brazil and Bolivia. By integrating maps of vegetation structures and flood frequencies, we are drawing closer to being able to create a map of ecological units in which the structure and qualities of the forest are related to the frequency of flooding and soil drainage. Vegetation profiles that illustrate the structure of these units are also presented. Our efforts will continue to focus on supporting national park teams and local indigenous communities for ongoing monitoring of the territory. Installation is planned of a permanent monitoring system based on a time series analysis of SENTINEL-1 radar images for the detection of deforestation and degradation.



INTRODUCCIÓN:

Marco de referencia

En 2017 la fundación MacArthur hizo un llamado para el desarrollo de productos que contribuyeran al conocimiento del estado de la Amazonia andina. Con antecedentes de trabajo en la zona y con interés de conocer el estado actual de la región amazónica occidental, presentamos una propuesta entre Amazon Conservation Team (ACT), Amazon Conservation (AC) y SarVision (compañía holandesa dedicada al desarrollo y el uso de la tecnología de sensores remotos especialmente de radar), con el ánimo de usar diferentes tipos de fuentes de información (imágenes de sensores remotos de tipo óptico y de radar) para la observación, el mapeo y el monitoreo de la Amazonia occidental. En este marco AC ha realizado y publicado en su plataforma MAAP (<https://maaproject.org/en/>) observaciones puntuales del territorio en temas de deforestación, intervención por minería, quemas e identificación de causas de cambio, usando imágenes ópticas de alta resolución y en algunos casos imágenes de radar. A nivel regional SarVision y Amazon Conservation Team desarrollaron y validaron estos mapas de línea base que hoy presentamos. Los mapas cubren la Amazonia occidental: todo el territorio amazónico de Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia, y una porción pequeña de Brasil; fueron desarrollados utilizando una sinergia entre las imágenes ópticas y las de radar, integrando series de tiempo de diez años, aproximándonos más a un mapa que capte las variaciones a largo plazo de un bioma complejo y en permanente cambio.



Antecedentes

El mapeo de la superficie de la tierra se ha realizado en los últimos treinta años basándose en imágenes de sensores remotos adquiridas por los satélites. Hay diferentes tipos de tecnologías de sensores remotos: las tecnologías ópticas, que son básicamente fotos tomadas de la superficie de la tierra usando diferentes gamas del espectro electromagnético, básicamente la porción óptica y la porción del infrarrojo. Por otro lado está la tecnología de radar, que usa longitudes de onda más largas (1-25 cm) con diferentes frecuencias y polarizaciones. Esta tiene la ventaja de que no está afectada por las nubes, que deterioran la calidad y la consistencia de las observaciones con sistemas ópticos, especialmente en las zonas tropicales. Además, las imágenes de radar son sensibles a la estructura de la vegetación, la biomasa y son capaces de detectar las inundaciones a cielo abierto y las inundaciones bajo el dosel del bosque, es decir, son ideales para el mapeo de los tipos estructurales de vegetación.

Desde hace seis años Amazon Conservation Team y SarVision han trabajado en el desarrollo de mapas para la Amazonia colombiana basados en tecnología de imágenes de sensores remotos de radar. En este marco de trabajo hemos publicado un mapa de la Amazonia colombiana para el año 2007-2008, en formato raster, a 25 m. de resolución, basado únicamente en imágenes de radar Alos PALSAR (Quiñones et al, 2017). Este producto consta de un mapa de estructura de vegetación con leyenda LCCS de la FAO (di Gregorio & Jansen, 1998) que integra información de estructura de vegetación e información de frecuencias de inundación, para paisajes planos y paisajes con pendientes. Adicionalmente se presentaron tres mapas o series temporales, que muestran los cambios en las inundaciones y en la cobertura vegetal para los períodos de 2007-2008, 2008-2009 y 2009-2010. Estos mapas, basados únicamente en imágenes de radar, fueron debidamente validados utilizando protocolos internacionales para la validación de productos raster y fueron los primeros generados con radar desde la campaña de Pro-RADAM en 1979. La tecnología dedicada a la clasificación de imágenes

del Radar Alos PALSAR permitió por primera vez mapear los límites de las varzeas y la inundación ocurrida bajo dosel para todo el territorio amazónico colombiano. Adicionalmente se hizo un mapeo de frecuencias de inundación que permitió dar más detalle en la definición de los tipos de humedales amazónicos (Ricaurte et al, 2019, Estupiñan et al. 2015). Pensamos que es una contribución importante y esperamos que algún día sea integrada a los mapas oficiales.

El producto que hoy presentamos es el resultado de un análisis de imágenes de radar Alos PALSAR que cubre un período de diez años, integradas con imágenes ópticas LandSAT. Es una innovación en la tecnología de clasificación que permite la integración sinérgica entre las imágenes ópticas LandSAT y las imágenes de radar. La integración de estas tecnologías no se ha realizado antes a grandes escalas para ejercicios de mapeos de áreas extensas. Por primera vez presentamos un producto que hemos denominado una “Línea base para el estudio de la Amazonia occidental”. Consta de tres mapas que muestran diferentes aspectos de un territorio ecológicamente complejo y maravilloso.

Lo que presentamos

1. En primer lugar presentamos un mapa de frecuencias de inundación, a 25 m. de resolución, que cubre observaciones de inundación a cielo abierto e inundación bajo dosel, por un período de diez años (2007-2017). Se analizaron once mosaicos completos de las imágenes Alos PALSAR-2 FB. Cada pixel en este mapa nos dice cuántas veces ese determinado pixel fue detectado como inundado.
2. El segundo es un mapa estructural de vegetación con leyenda LCCS de la FAO, para el año 2017, a 25 m. de resolución. Se utilizó una tecnología innovadora que permite la integración de imágenes Alos PALSAR-2 FB con imágenes Landsat dispuestas en un mosaico, a las que se aplicó un algoritmo para la remoción de las nubes. La leyenda es de tipo estructural y combina la información del terreno (geomorfología) con las frecuencias de inundación (producto 1) y la estructura de la vegetación.
3. Tercero, presentamos un mapa de cambio de cobertura de vegetación para dos períodos de observación, 2008-2010 y 2010-2017, a 25 m. de resolución. En él mostramos procesos de deforestación y regeneración sobre un mapa básico de bosque no bosque.

Estos tres mapas nos permiten evaluar los patrones de distribución de la vegetación, las tendencias de los cambios y la dinámica del agua en un período de diez años. Esta información a largo plazo permite incluir eventos extraordinarios que afectan el bioma pero que son claves en su funcionamiento y su autorregulación. Por ejemplo, las inundaciones, que a veces puede parecer que tienen ciclos anuales, sufren de cambios supra-anuales y de eventos extremos excepcionales como los inducidos por efectos climáticos globales tales como los fenómenos el Niño y la Niña.

Por esta razón presentamos estos mapas como algo que aspiramos a que se convierta en un producto en permanente cambio, ya que pretendemos actualizarlo cada vez que haya información nueva disponible. De esta manera los definimos como “productos vivos”.

La intención

Sabemos que en la última década, la región amazónica ha sido mapeada por las agencias ambientales locales de cada país, (Murcia et al, 2009; Murcia et al, 2014) y por varios grupos, proyectos y asociaciones no gubernamentales que trabajan en el desarrollo de conocimiento de la zona, para su conservación y su manejo (Perú, Colombia, Bolivia, Ecuador).

Nuestra intención con este mapa no es reemplazar ni comparar con la información ya existente, sino contribuir y complementar con el conocimiento que tenemos sobre la zona. Los aportes de la tecnología al combinar las imágenes de radar y de satélite de una manera automatizada permiten un mapeo consistente a lo largo y ancho del territorio y no están sujetos a interpretaciones subjetivas de diferentes intérpretes.

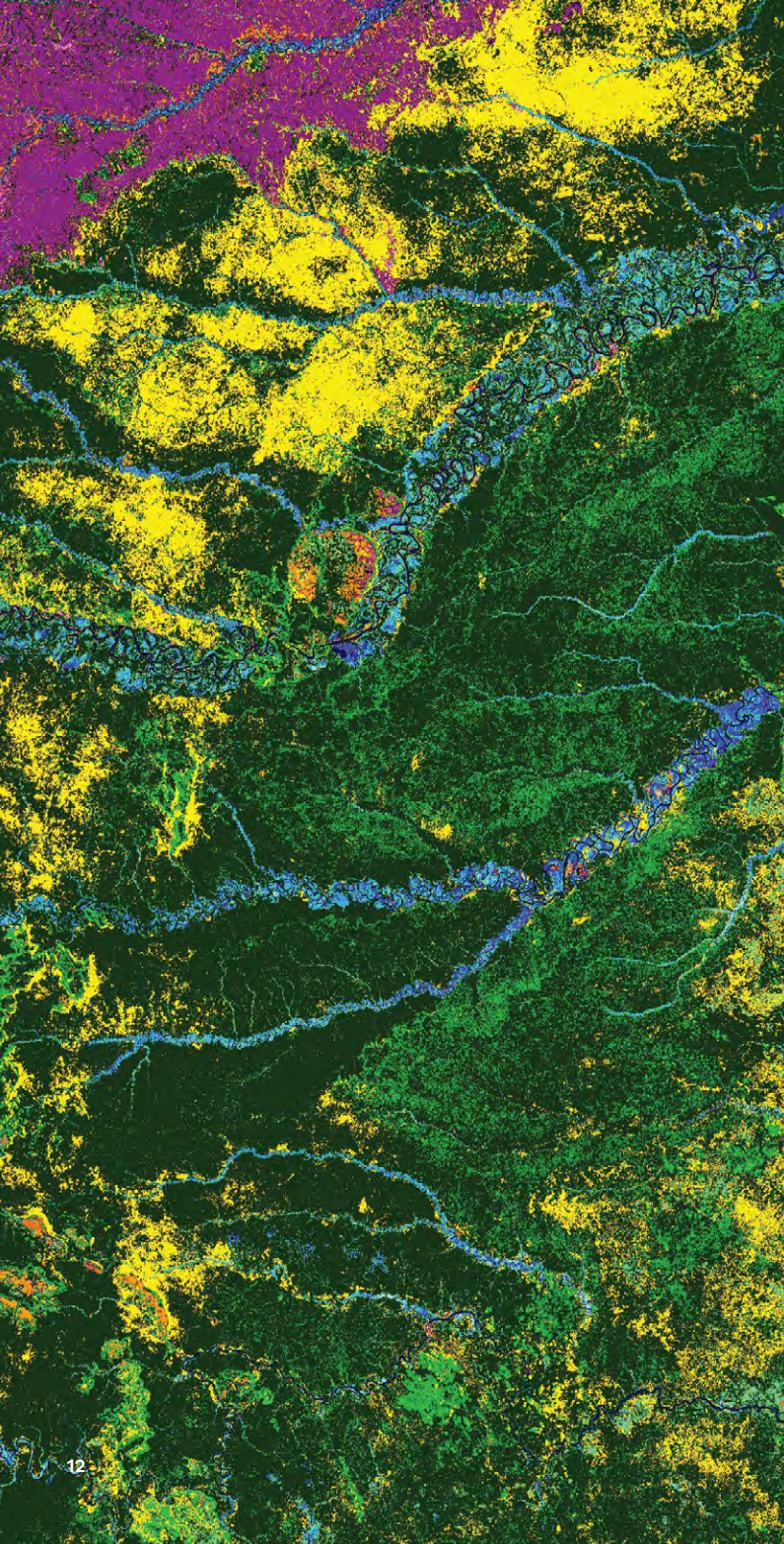
Queremos informar a un público en general sobre la riqueza natural que este ecosistema representa para nuestros países y para el mundo en general, especialmente en términos de la alta biodiversidad de estos frágiles ecosistemas y en términos de la complejidad que alcanza el ciclo del agua en este territorio anfibio.

Queremos mostrar que es necesario tener una línea base que integre información de varios años para la comprensión de los cambios naturales y no naturales que pueden ocurrir en la zona y que podamos comprender estos procesos en un marco de referencia amplio, reconociendo la complejidad del bioma y sus cambios naturales.

Queremos además usar esta información como un punto de partida para el monitoreo a largo plazo de algunos territorios de importancia especial, tales como los parques nacionales y las comunidades indígenas, que son las áreas donde se protege el territorio activamente de influencias humanas y que de una u otra manera deben ser salvaguardados. Labor que esperamos iniciar pronto utilizando tecnología de radar Sentinel-1 mediante observaciones cada 12-24 días.

Queremos que la gente después de estudiar el mapa y de leer este reporte se enamore del territorio amazónico y se sienta privilegiada y orgullosa de pertenecer a un país con un territorio tan hermoso y rico en paisajes, biodiversidad y agua. Pretendemos inspirarlos y llevarles este territorio al corazón para que lo asuman como propio y se responsabilicen comunitariamente de su conservación y su manejo sustentable. Conocer para apreciar, apreciar para defender.

Hoy más que nunca, cuando las políticas de cada gobierno cambian sus posiciones conservacionistas por extractivistas de un momento a otro, debemos elegir y exigir políticamente programas que estén por encima de las decisiones del gobierno de turno, que garanticen la integridad del bioma amazónico y de sus habitantes, tanto humanos como de otras especies.



El área de estudio

El llamado de la Fundación MacArthur estaba dirigido específicamente hacia la Amazonia andina, es decir, el territorio correspondiente a las cuencas de los ríos que nacen en cordillera de los Andes, se desprenden por el piedemonte andino hacia las planicies amazónicas y confluyen formando el gran Río. Sin embargo, no había indicación específica alguna que definiera los límites específicos del territorio a estudiar. Por esta razón decidimos que por lo menos todos los territorios amazónicos pertenecientes a los países andinos, tales como Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia, deberían estar incluidos bajo la cota de altura de 500 msnm. Adicionalmente decidimos incluir áreas interesantes desde el punto de vista de los ecosistemas amazónicos especiales y por eso adicionamos una porción de Brasil que incluye áreas de inundación de varzeas extensas como Mamiraua y zonas de ecosistemas especiales como las campinaranas o de bosques sobre arenas blancas. Extendimos el estudio por el sur a los bosques más estacionales que se encuentran en Bolivia y una pequeña extensión en el bosque seco del chaco y del pantanal brasileiro.

La tabla 1 muestra el número total de Km² incluidos en este proyecto. Se mapeó el 58,82 % de la cuenca total amazónica. El área total de estudio cubre 3.601.447.83 Km², de los cuales el 40 % corresponde al 38 % de la Amazonia brasilera y el 60 % corresponde a la casi totalidad de los territorios amazónicos de Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia y una pequeña fracción del territorio amazónico venezolano.

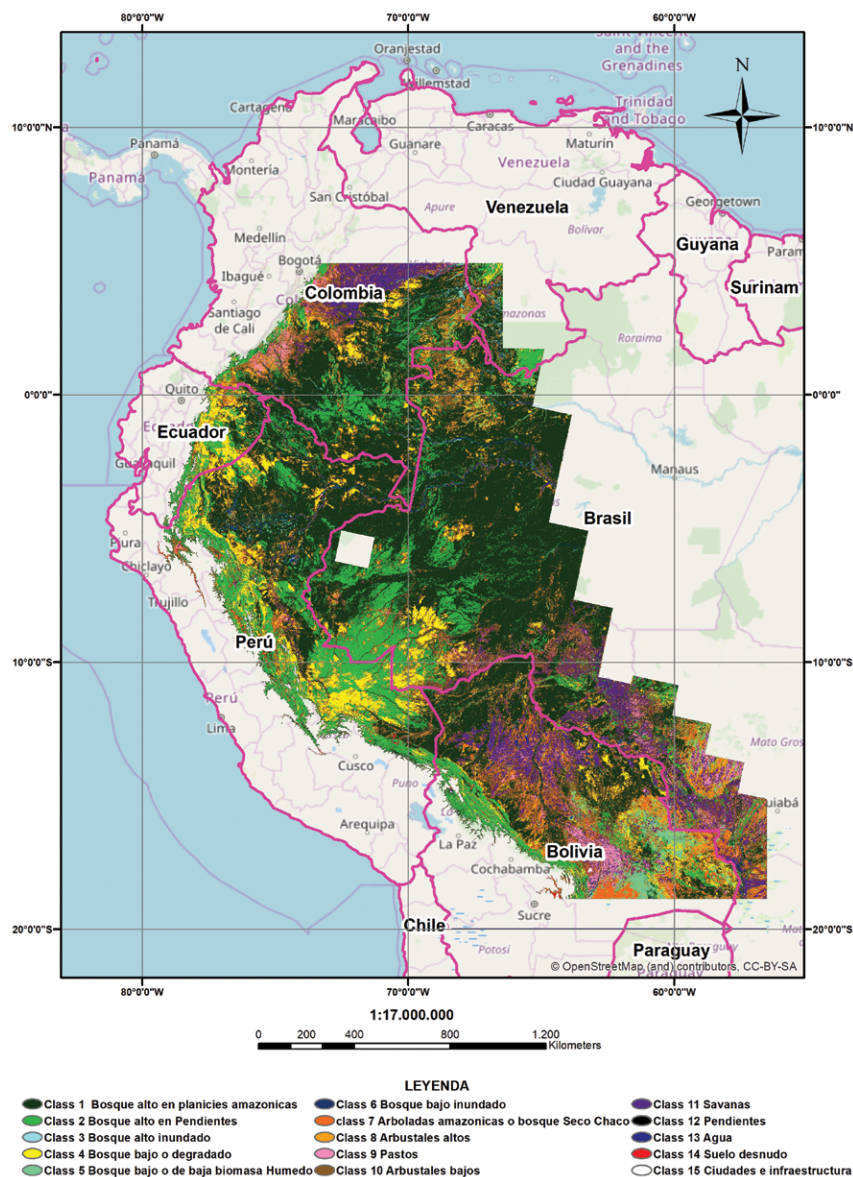
Tabla 1: Área total por país incluida en los mapas de línea base. Se incluyen por país una o varias zonas de interés por ser un ecosistema especial o por la ocurrencia de procesos de cambio de alto interés.

País	Área en Km ²	% de de la cuenca total	% área mapeada	% de amazonia mapeada por país
Colombia	567.513,15	9.27	15.76	100
Ecuador	93.816.85	1.53	2.60	100
Perú	729.849.07	11.92	20.27	98
Bolivia	694.686.96	11.35	19.29	100
Brasil	1.453.068,40	23.73	40.35	38
Venezuela	62.513.14	1.02	1.74	2
Amazonia mapeada	3.601.447.83	58.82	x	x
Amazonia total	6.122.763.00	x	x	x

Localización

La figura 1 muestra el mapa con la localización del área de estudio dentro del mapa de Suramérica. En Colombia incluye no sólo la región de las cuencas de los ríos que van al río Amazonas, sino también las cuencas de los ríos Guaviare, Mataven, Inírida, que van al Orinoco. En Ecuador y Perú se incluye toda la región amazónica para cada país, y para Bolivia se incluye además de la región amazónica una parte de la región del Chaco. Adicionalmente se incluyen las zonas de Brasil fronterizas a estos territorios. El rango de latitud va desde 4° al norte hasta 18° al sur y de 55° hasta 78° de longitud oeste.

Figura 1: Mapa mostrando la localización del área mapeada en el marco de este proyecto.



Clima

El territorio incluido en el análisis abarca un rango latitudinal de casi 23º, 5º al norte y 18º al sur del Ecuador, desde la zona norte en Mataven, Colombia, hasta el Bosque del Chaco en Bolivia. Las diferencias climáticas a lo largo y ancho del territorio permiten la definición de tipos de climas y zonas de vida. Según la clasificación de Koppen-Geiger (Hylke et al., 2018) se presentan climas de bosque tropical (Af) y de sabana tropical (AW). Las zonas de vida de acuerdo con el sistema de clasificación de Holdridge (Zamora 2009) corresponden a bosque húmedo y bosque seco en el caso del Chaco.

El rango latitudinal tiene influencias en la cantidad, la intensidad y la estacionalidad de las precipitaciones, así como en las temperaturas promedio, mínimas y máximas, y las duraciones e intensidades de los períodos secos. En general las áreas cercanas al ecuador presentan menos estacionalidad en las lluvias, y los períodos secos son cortos y a veces

indetectables; se presentan sequías ocasionales (definidos como meses en los que llueve menos de 100mm). En general la ocurrencia del período seco y lluvioso tiene que ver con la localización y la cercanía al Ecuador geográfico, con el movimiento de la zona de convergencia intertropical y la influencia de los vientos alisios. Las precipitaciones totales promedio en las zonas ecuatoriales exceden 2.000mm al año y las temperaturas promedio por mes son muy constantes, con mayores variaciones entre el día y la noche que a lo largo del año. Estos patrones van cambiando con la distancia al ecuador, bien sea hacia el norte o hacia el sur. La estacionalidad en las lluvias se hace más marcada, presentando meses de sequía que varían de dos a cuatro según la región. La temperatura promedio varía más a lo largo del año y las diferencias entre temperaturas máximas y mínimas es mayor. La tabla 2 muestra algunos indicadores climáticos para diferentes municipios en la zona de estudio. Están ordenados de norte a sur para poder apreciar las variaciones.

Tabla 2: Información climática para algunos municipios amazónicos, ordenados de norte a sur.

País	Municipio	Precipitación anual (mm)	Temperatura promedio anual (°)	Temperatura mínima promedio (°)	Temperatura máxima promedio (°)	Ocurrencia y duración de la estación seca (meses)	Ocurrencia y duración de la estación lluviosa meses)
Colombia	Puerto Inírida	2876	27.2	22	34.2	Ene/Feb	Abr-Oct
Colombia	Pedraera	3291	25.9	20.8	30.8	-----	Oct-Jul/10
Ecuador	Putumayo	3086	25.5	20.4	31.2	-----	Mar-Nov/9
Colombia	Leticia	2846	26	20.1	31.4	-----	Oct-May/8
Perú	Tarapoto	1188	25	17	32.3	Jun-Ago/3	Ene-Abr/4
Perú	Pucallpa	1667	26.4	19.2	33.4	Jun-Ago/3	Marzo/1
Bolivia	Rurrenabaque	1894	25.1	16.3	32.8	Ago-sep/2	Dec-Mar/4
Bolivia	Ivrigarzama	3238	25.2	14.9	32.8	-----	Oct-Abr/7

Geología

La geología de la cuenca amazónica es bastante compleja y no es el objetivo de esta publicación. En general la Amazonia es el resultado de procesos geodinámicos internos que nos indican la disposición inicial de los materiales profundos y de procesos geodinámicos externos que explican la disposición de los materiales superficiales y sobre todo la formación de los paisajes a lo largo de la historia geológica en la actualidad. Los rasgos característicos de la Amazonia actual son el resultado de factores diversos que se han ejercido, simultáneamente o sucesivamente, a diversas escalas de tiempo y de espacio.

Respecto a los procesos geodinámicos internos, la alta Amazonia se constituyó, en el geosinclinal sub-andino, sobre los sedimentos continentales o marinos. Geográficamente, corresponde a la región drenada por el abanico fluvial comprendido entre el Putumayo y el Ucayali. El sinclinal comprendido entre los Andes y el escudo Guyano-brasilero se deforma y se llena alternativamente de sedimentos continentales y marinos o lagunas. La Amazonia central se instaló en la fosa de hundimiento que separa el escudo guyanés del brasileño.

Una intensa erosión fue el resultado de la formación del plano sedimentario terciario de las areniscas continentales que cubren el escudo guyanés. El curso medio del Amazonas y sus grandes afluentes drenan los escudos y entallan los depósitos. Los afluentes del curso bajo drenan sobre todo las formaciones Roraima y Barreiras. Esta historia se ve reflejada en algunas características de la Amazonia actual: 1) La asimetría de la cuenca de 700.000 km² al continente suramericano, la línea divisoria de aguas se encuentra a menos de 100 km del Pacífico y a más de 3.000 km del Atlántico; adicionalmente, a nivel de alturas y pendientes, Iquitos se encuentra a 100 msnm y 2.500 km de la desembocadura del Amazonas; 2) La presencia de sedimentos marinos de origen “pacífico” y de sedimentos continentales de origen “guyano-brasilero” al este de los Andes; 3) La presencia de rocas volcánicas (o de origen volcánico) al pie de los Andes, que hace que su potencial de fertilidad contraste con la pobreza del suelo del resto de la cuenca; 4) Recientemente se reportaron sedimentos marinos del Caribe en el noroccidente amazónico que indican una inundación marina que pudo llegar hasta el centro de Perú (Jaramillo et al. 2017).

La geodinámica externa conjuga los efectos de tres factores: 1) La inestabilidad tectónica, de la cual resultan los sismos y los derrames volcánicos especialmente de los Andes; 2) La inestabilidad climática, de la cual resultan alternaciones de períodos fríos o cálidos, húmedos o secos; 3) La inestabilidad glacial, de la cual resultan las modificaciones del nivel de las aguas y las diferencias en la vegetación. La intensidad y la predominancia de los diferentes fenómenos geodinámicos externos cambiaron drásticamente en los períodos glaciares e interglaciares e influyeron en el paisaje y la vegetación en esos períodos.

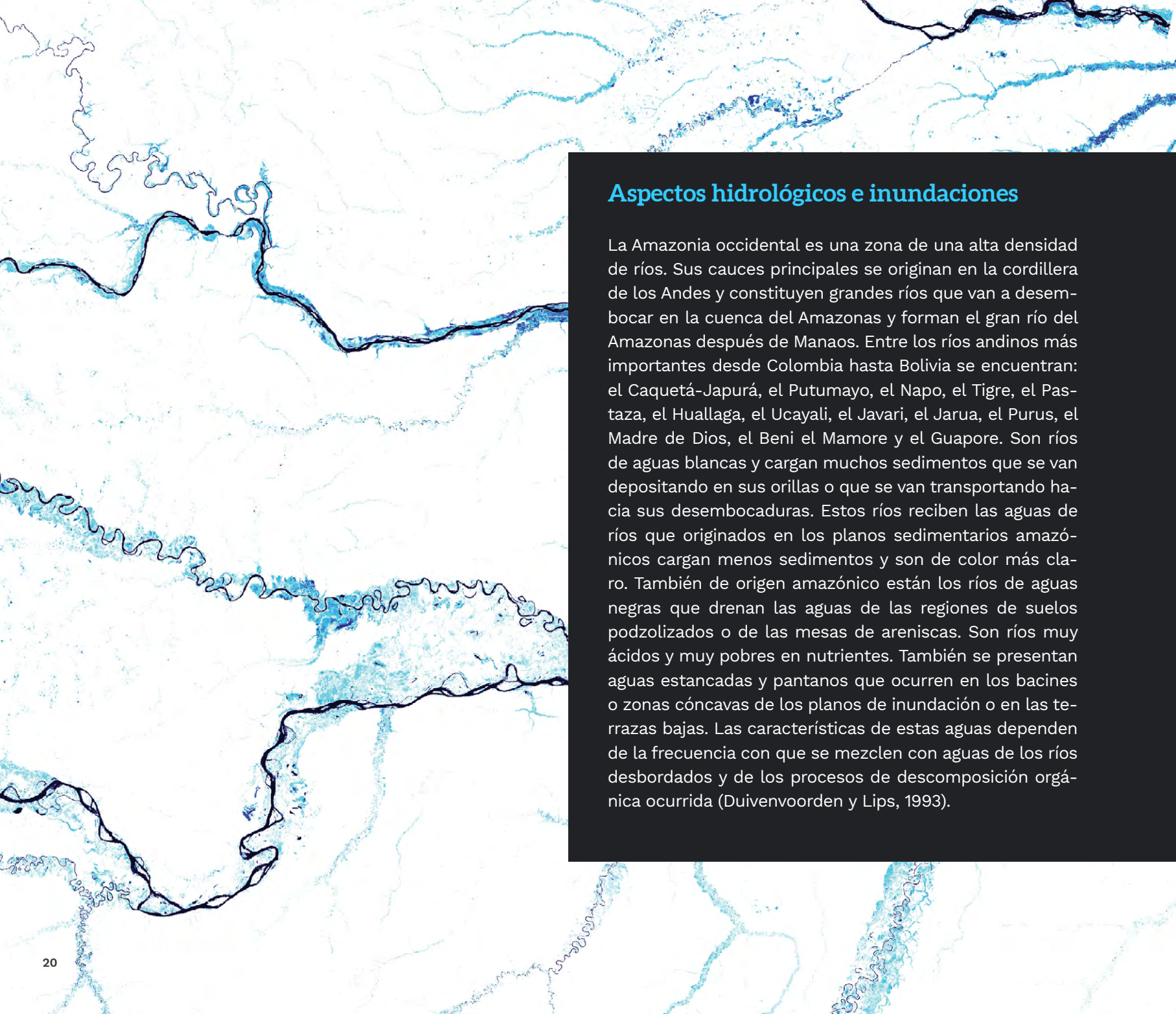
Las variaciones en los tipos de vegetación a través de la historia geológica han sido evidenciadas por estudios de polen en diferentes regiones de la cuenca. Estos procesos internos y externos han tenido una influencia en la ecología actual de la cuenca. Diversas teorías y tipos de evidencia tratan de explicar la alta diversidad biológica en la cuenca y combinan los procesos internos o externos como causa directa o indirecta de la alta diversidad de especies.



Geoformas

En la Amazonia occidental hay una diferenciación entre la selva alta y la selva baja. La selva alta se encuentra entre 1.000 y 400msnm, donde ocurren formaciones de cañones y valles intermedios ocasionados por la meteorización de los ríos de origen andino en su búsqueda hacia el plano amazónico. Hay diferentes tipos de valles de diversas edades: valles longitudinales, que van paralelos a la cordillera y pueden presentar diferente morfología dependiendo de su edad y su nivel de erosión; otros valles van perpendiculares a la cordillera y se denominan valles transversales. Otros son de origen glacial. Hay formaciones especiales de cañones llamados “Pogos”, que son angostos y profundos, formados por los ríos andinos que buscan camino a la cuenca amazónica (Castro Medina, 2013). En la planicie amazónica distintos procesos de tipos tectónico, metamórfico o aluviales ocurridos sobre los diferentes tipos de sedimentos han generado los paisajes que hoy conocemos: 1) ocurren formaciones de roca dura que sobresalen en el paisaje y forman colinas aisladas o mesas de areniscas. 2) Los planos sedimentarios del terciario se presentan con diferentes niveles de disección y regularidad y generan

paisajes desde planos a muy disectados. 3) Las terrazas fluviales son procesos de depósitos horizontales de un cauce en movimiento, que se repite sucesivamente y da origen a un paisaje escalonado con terrazas antiguas (terrazas altas), que pueden mostrar disecciones o ser planas y por lo general son zonas bien drenadas. Las terrazas jóvenes (terrazas bajas) están más cercanas al cauce del río y pueden tener partes planas bien drenadas o partes bajas y pantanosas. 4) Por último están las llanuras aluviales de los ríos de origen andino y amazónico que van cortando el territorio y creando los paisajes y geoformas de las planicies de inundación. Estas planicies de inundación pueden tener áreas de depósitos aluviales de origen meándrico, los llamados barrizales o cochas en Perú. Además se presentan geoformas con una topografía convexa-cóncava, que forman las barras de cauce, los diques naturales, los bacines y los canales abandonados. (Duivenvoorden y Lips, 1993). Los ríos, en su paso por su territorio, van modificando el paisaje continuamente debido a los procesos de inundación, sedimentación y erosión o socavación de las riberas. En pocos años se pueden ver las dinámicas en el cambio del paisaje debido al baile de los ríos.



Aspectos hidrológicos e inundaciones

La Amazonia occidental es una zona de una alta densidad de ríos. Sus cauces principales se originan en la cordillera de los Andes y constituyen grandes ríos que van a desembocar en la cuenca del Amazonas y forman el gran río del Amazonas después de Manaos. Entre los ríos andinos más importantes desde Colombia hasta Bolivia se encuentran: el Caquetá-Japurá, el Putumayo, el Napo, el Tigre, el Pastaza, el Huallaga, el Ucayali, el Javari, el Jarua, el Purus, el Madre de Dios, el Beni el Mamore y el Guapore. Son ríos de aguas blancas y cargan muchos sedimentos que se van depositando en sus orillas o que se van transportando hacia sus desembocaduras. Estos ríos reciben las aguas de ríos que originados en los planos sedimentarios amazónicos cargan menos sedimentos y son de color más claro. También de origen amazónico están los ríos de aguas negras que drenan las aguas de las regiones de suelos podzolizados o de las mesas de areniscas. Son ríos muy ácidos y muy pobres en nutrientes. También se presentan aguas estancadas y pantanos que ocurren en los bacines o zonas cóncavas de los planos de inundación o en las terrazas bajas. Las características de estas aguas dependen de la frecuencia con que se mezclen con aguas de los ríos desbordados y de los procesos de descomposición orgánica ocurrida (Duivenvoorden y Lips, 1993).

Los niveles de los ríos, tanto andinos como amazónicos y los de aguas negras, varían a lo largo del tiempo. Se puede decir que tienen una estacionalidad básica anual durante la cual su nivel puede cambiar debido a la ocurrencia de lluvias locales, o lluvias en las cabeceras de los ríos, o debido a los aportes de agua de los afluentes. Esta estacionalidad puede generar cambios en el nivel del río entre siete y ocho metros, sin embargo, hay eventos supra anuales y de sequía que pueden generar diferencias entre niveles mínimos y máximos de más de diez o doce metros. Estos eventos extremos pueden ocurrir ocasionalmente y estar ligados a eventos climáticos más globales tales como los efectos del Niño y la Niña. Los regímenes y las frecuencias de inundación de los planos de inundación y de los paisajes que ahí ocurren tienen una influencia directa sobre la vegetación de esos paisajes: por ejemplo, áreas permanentemente inundadas tendrán vegetación de pantanos con muchas palmas, mientras áreas bien drenadas tendrán una vegetación de bosque más desarrollado con biomasa alta. Las duraciones de las inundaciones en los diferentes paisajes dependen de la estructura, la altura y la orientación de las formas del paisaje.

Los suelos

La clasificación de los suelos de la Amazonia no es el objetivo de esta publicación. Sin embargo, es necesario mencionar que la clasificación de los suelos está relacionada con su localización dentro del paisaje, su drenaje y su riqueza en nutrientes. Los procesos de formación de suelos y su evolución a lo largo de tiempo son bastante complejos de describir y no vienen al caso, pero en general podemos decir que en la cuenca occidental de la Amazonia encontramos: 1) Suelos sobre los valles menores del piedemonte con algunos depósitos volcánicos; 2) Suelos de los abanicos del piedemonte; 3) Suelos de piedemonte cuyos horizontes delgados son el resultado de procesos erosivos en las pendientes; 4) Suelos de origen aluvial, que ocurren a lo largo de los ríos; 5) Suelos sobre terrazas; 6) Suelos originados por la denudación de los planos sedimentarios que cubren gran parte de la región, y también suelos que están relacionados directamente con formaciones geológicas como los suelos de areniscas sobre las afloramientos rocosos (http://www.corpoamazonia.gov.co/region/Jur_suelos.htm).

Duivenvorden y Lips, 1993, presentan una clasificación de los suelos para la zona del medio Caquetá basada en la intensidad del drenaje del suelo, la ocurrencia de podzolización (empobrecimiento del suelo por el lavado de los nutrientes) y su localización en el paisaje, básicamente en planos de inundación y en zonas de tierra firme. La división básica se presenta en la tabla 3. Esta explicación, aunque muy superficial, es relevante para la descripción de la leyenda de los mapas que presentamos en este trabajo y que explicaremos más adelante. Esta clasificación coincide mucho con la que hace (Rodríguez Achung, 1990) de los suelos de la Amazonia peruana.

Tabla 3: División básica de los suelos del área del río Caquetá según Duivenvoorden & Lips, 1993. Para cada una de estas categorías existe una clasificación dominante con características propias de acidez, profundidad, textura, consistencia y composición

País	Drenaje	Riqueza de nutrientes
Suelos de los planos de inundación	Bien drenados	Moderadamente ricos
		Moderadamente pobre
		Pobres
	Mal drenados	Moderadamente ricos
		Pobres
Suelos de tierra firme	Bien drenados	Pobres
		Muy pobres
	Mal Drenados	Pobres
	Suelos Podzolizados	Muy pobres



La vegetación

La descripción estructural y florística de la vegetación existente en la Amazonia occidental ocuparía tomos enteros. Sin embargo, las descripciones hechas por Duivenvoorden & Lips, 1993, sobre la vegetación del medio Caquetá sirven para hacer una descripción general de la estructura de la vegetación de la Amazonia occidental en general, excepto quizás algunos bosques más secos y espinosos en zonas septentrionales en Perú y Bolivia.

La estructura de la vegetación y su composición fisionómica dependen en gran medida del clima en el que crece, del tipo de paisaje donde se encuentra (planos de inundación o zonas de tierra firme), de la morfología de paisaje (zonas disectadas sujetas a la erosión o zonas planas), del tipo de suelo en el que crece (suelos bien drenados, mal drenados, pobres o ricos), de la duración y la frecuencia de la inundación, si es en zonas inundadas.

En general encontramos zonas cubiertas por bosques altos (20m-30m de altura) de dosel cerrado, de biomasa alta o intermedia con diferentes densidades de árboles, arbolitos y palmas, que ocurren generalmente en suelos bien drenados, en terrenos de tierra firme o con posible inundación, de ocurrencia esporádica.

Hay también bosques intermedios, bajos y muy bajos con alturas menores (8m-14m), con altas densidades de árboles y arbolitos que crecen en áreas mal drenadas y/o en las zonas de tierra firme o en las planicies de inundación.

También se presentan los bosques con altas densidades de palmas y diferentes densidades de arbolitos y árboles de diferentes alturas, con biomasa alta, media o baja y diferentes coberturas de dosel. Estos tipos de bosque son muy interesantes ya que presentan muchas variaciones en la región y su estructura tiene mucho que ver con el mal drenaje de los suelos; en su mayoría ocurren en áreas pantanosas o con suelos saturados de agua. Por ejemplo, en las zonas del parque Nacional Pacaya Sumiría, en Perú, hay zonas extensas de pantanos o aguajales con vegetación diversa que crece sobre zonas muy frecuentemente inundadas o pantanos.

Igualmente hay zonas de arboladas amazónicas con vegetación predominante de árboles, pero con un dosel abierto. Estos tipos estructurales ocurren sobre suelos relativamente pobres sobre afloramientos rocosos.

También ocurre en el noroccidente brasilero y el nororiente colombiano un tipo de vegetación que crece sobre arenas blancas en suelos muy pobres, tiene una estructura especial de árboles o arbolitos o varietales, que a veces se inundan y constituyen un ecosistema con una diversidad diferente (Adeney et al. 2016).

También hay zonas de arbustales de diferentes alturas y densidades y las zonas de sabanas amazónicas donde predominan las gramíneas. Las llamadas sabanas amazónicas son ecosistemas muy estacionales y con un suelo pobre, en suelos bien drenados que se pueden inundar extensivamente o simplemente encharcarse. Estas áreas sufren muchas quemadas, naturales o inducidas por humanos y son de uso frecuente para pastoreo de ganado. Sobre salen las sabanas de los llanos de Moxos en Bolivia. También están las zonas de pastos y arbustales de sucesión, en suelos degradados, que son el resultado de procesos de deforestación y pastoreo. Predominio de gramíneas en suelos muy degradados, arbustales y crecimientos secundarios. Ocurren en áreas de colinas en el piedemonte andino e o en zonas planas de la cuenca amazónica.

El diagrama presentado en la figura 2 fue publicado en los mapas de Divenvoorden and Lips, 1993. Ilustran muy bien las relaciones ecológicas entre la riqueza de los suelos y la eficiencia del drenaje y las frecuencias de inundación, con la estructura de los tipos de vegetación. En este caso para ecosistemas inundados, mientras más pobres los suelos y menos la eficiencia del drenaje, menor es la altura de la vegetación y mayor la ocurrencia de palmas y arbolitos. Además, mientras más intensas y frecuentes las inundaciones, menor el tamaño de los bosques.

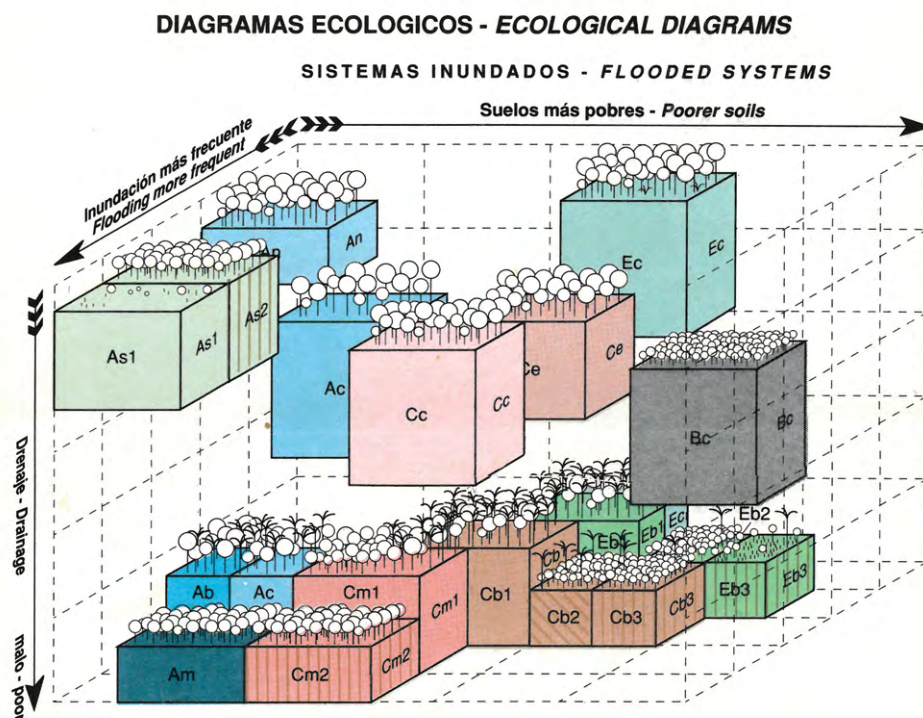


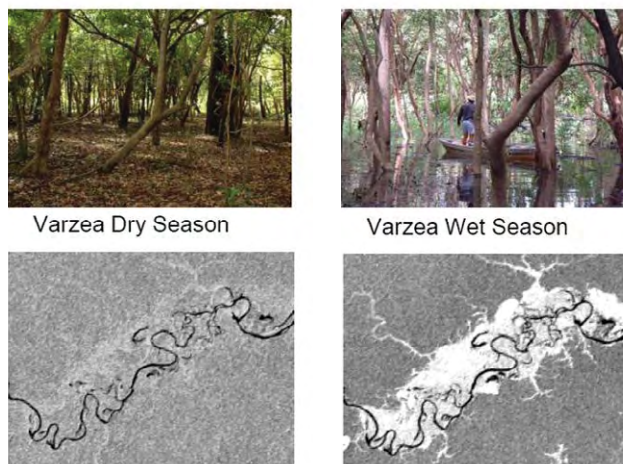
Figura 2: Diagrama Publicado por Duivevoorden and Lips, 1993, que muestra la relación entre la riqueza del suelo, las frecuencias de inundación y el drenaje del suelo en la estructura de la vegetación de los sistemas inundados del medio Caquetá, definiendo así las Unidades ecológicas del paisaje. Este diagrama es de gran utilidad en la definición de los rótulos de la leyenda del Mapa de estructura de la vegetación.

Metodología y tecnología usada

Insumos

Los productos se basaron en mosaicos de radar (SAR) de la plataforma ALOS PALSAR-1 y 2 operada por la agencia espacial japonesa (JAXA). El sistema Alos PALSAR consta de un sensor activo de radar de apertura sintética de banda L; se empleó la modalidad de onda fina o Fine Beam (FB), procesado a una resolución espacial de 25 m, con polarizaciones HH y HV y una extensión de 70 km (JAXA, 2008). Estas imágenes son de libre distribución. El radar es un sistema de sensor remoto activo que envía ondas electromagnéticas de diferentes longitudes de onda que interactúan con el terreno y parte de ellas retornan al radar para generar la imagen. Las ventajas del uso de imágenes de radar en zonas tropicales son muy interesantes ya que no están afectadas por las nubes o sus sombras. Adicionalmente, el radar es capaz de penetrar en el dosel del bosque y observar las inundaciones bajo dosel muy consistentemente. Estas características permiten el monitoreo consistente de deforestación y de inundaciones. La figura 3 muestra la comparación entre las imágenes de radar FB-HH durante la época seca y la época lluviosa cuando el suelo del bosque de varzea se inunda.

Figura 3: Imágenes de radar Alos PALSAR -FB-HH adquiridas para la misma zona durante la estación seca y la estación lluviosa, cuando se inunda el bosque de varzeas. Se puede observar que en la imagen adquirida en la estación seca, escasamente se distingue el bosque de Varzea. Sin embargo, cuando el bosque se inunda el valor de retorno de la imagen de radar aumenta considerablemente y se puede delimitar con gran precisión la zona que está inundada bajo el dosel.



En total se contó con trece imágenes de radar, para cada polarización, para los años 2007, 2008, 2009, 2010, 2015, 2016, 2017. Además se calcularon datos estadísticos básicos entre las imágenes como el valor máximo, el valor mínimo, el valor promedio, para los años del 2007 al 2010 y del 2015 al 2017. Así en total se contó con 26 imágenes (trece por polarización) para el análisis de diez años de observación.

Se realizó un mosaico, libre de nubes, para toda la zona de estudio, de imágenes Land-SAT, utilizando la plataforma de procesamiento de “Google Engine” con imágenes de los años 2016 y 2017. Este mosaico en general resultó de muy buena calidad, excepto por una zona en la parte central de la imagen donde aparecía el efecto de nubes y de sombra de nubes. Para lograr una consistencia en el proceso de mapeo y no afectar las estadísticas de clasificación, se decidió remover el área afectada, que básicamente correspondía a una imagen Land-SAT. El mosaico de Land-SAT se remuestreó a la misma resolución de las imágenes de radar (25m). Para este mosaico se calcularon los primeros tres componentes principales (CI) de las ocho bandas ópticas disponibles y el Índice NDVI de vegetación (Índice de vegetación).

Adicionalmente se utilizó la imagen de pendiente calculada utilizando el modelo digital de terreno (MDT), de acceso libre de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) comandada por la NASA, que tiene 30 m de resolución espacial.

Procesamiento

Las imágenes de radar utilizadas fueron procesadas por JAXA. Las imágenes ya están georreferenciadas y registradas y se han corregido los efectos de relieve y los radiométricos. Están disponibles en valores de intensidad que se pueden convertir en valores de retorno expresados en decibeles (dB) utilizando una ecuación matemática simple. Las imágenes de Radar y el mosaico de Land-SAT se registraron con una precisión de menos de un pixel.

En la clasificación se empleó el software IDL/ ENVI, con la implementación de algunos algoritmos desarrollados internamente en SarVision. Se empleó una fusión entre clasificación no supervisada y supervisada de tipo temática, empleando el algoritmo paramétrico de máxima probabilidad (maximum likelihood), donde cada pixel es agregado a una clase de acuerdo con su matriz de covarianza estadística. El resultado es una clasificación donde las clases de la leyenda están separadas por distancias estadísticas, formando clústeres. La distancia calculada entre clústeres es información que se utiliza en la generación de la leyenda final del mapa. Asimismo, se aplicaron procedimientos pos-clasificación adicionales como aplicación de filtros para mejoramientos del efecto del ‘speckle’. El speckle es un “ruido” granular inherente al radar de apertura sintética (SAR) que degrada la calidad de la imagen y que se evidencia en las clasificaciones finales. Todo el proceso que incluye pre-procesamiento, procesamiento y clasificación de imágenes hasta lograr un producto final, tuvo una duración de seis meses

Para la creación de los diferentes mapas y su clasificación se escogieron distintas combinaciones de imágenes para cada uno de los productos:

1. **Mapa de frecuencias de inundación 2007-2017:** Este mapa se realizó utilizando solamente las clasificaciones de las imágenes disponibles AlosPALSAR-HH en las clases, inundación a cielo abierto e inundación bajo dosel. En total se compilaron trece clasificaciones correspondientes al periodo 2007-2017, en un solo mapa en el que cada pixel dice el número de veces que fue detectado inundado.
2. **Mapa de estructuras de vegetación 2017:** Este mapa se creó con la combinación de imágenes, máxima total del radar AlosPALSAR HH, la polarización HV de AlosPALSAR y los tres primeros componentes principales del mosaico LandSAT.
3. **Mapa de cambio de cobertura de vegetación 2007-2017:** Este mapa se realizó combinando dos clasificaciones. La primera utiliza las imágenes de radar AlosPALSAR- HV de las imágenes correspondientes al 2007 y 2010, y la segunda las imágenes AlosPALSAR- HV de los años 2010-2017. La definición de las señales para la clasificación de estos mapas estuvo enfocada a las clases donde ocurría el cambio, es decir, alto valor de retorno en un año y bajo valor de retorno en el segundo año. De esta manera las clases de cambio fueron detectadas y mapeadas. Las demás clases se agruparon entre bosque, no bosque, agua, pendientes y ciudades. Las clases de cambio detectadas para la clasificación entre 2007 y 2010 fueron superpuestas en el mapa de cambio del 2010-2017, para completar el mapa.

Metodología y marco conceptual en el mapeo de la vegetación y desarrollo de la leyenda del mapa de tipos estructurales

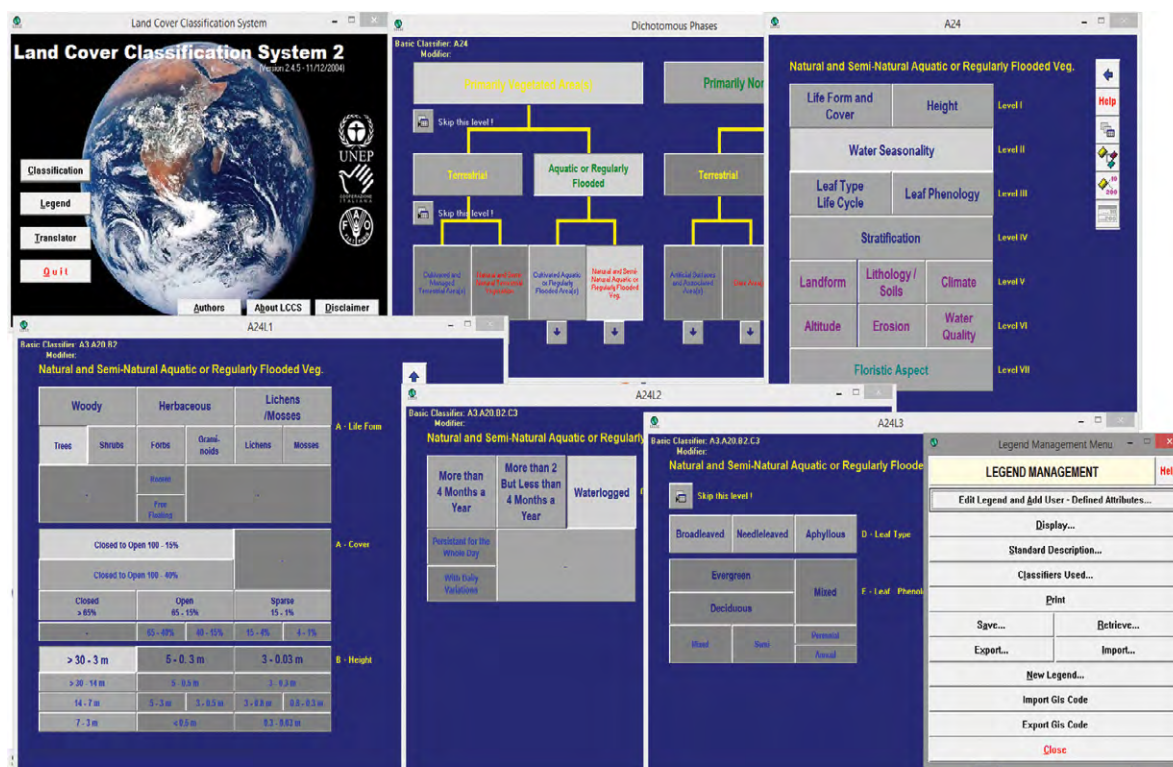
Se hizo el análisis de 400 señales extraídas de las imágenes de radar y LandsAT, resultado de las clasificaciones no supervisadas de diez ventanas elegidas a lo largo y ancho del área de estudio, con el ánimo de incluir toda la posible variación estadística. De las 400 señales estudiadas, se escogieron 85 para la clasificación supervisada. La escogencia de las señales para el desarrollo de la leyenda se basó en la información extraída de los valores de retorno promedio del radar y de los componentes principales del Land-SAT de esas 85 señales. Se calcularon los promedios, los valores máximos y mínimos para cada clase y las distancias estadísticas entre las diferentes clases para hacer un análisis de clúster que permitió reducir el número de señales. Las clases del mapa resultado de la clasificación supervisada con 85 clases fueron agrupadas usando un análisis de clústeres hasta llegar a clases que conforman la leyenda del Mapa de estructura de Vegetación. En total se definieron quince clases estadísticamente y ecológicamente diferentes.

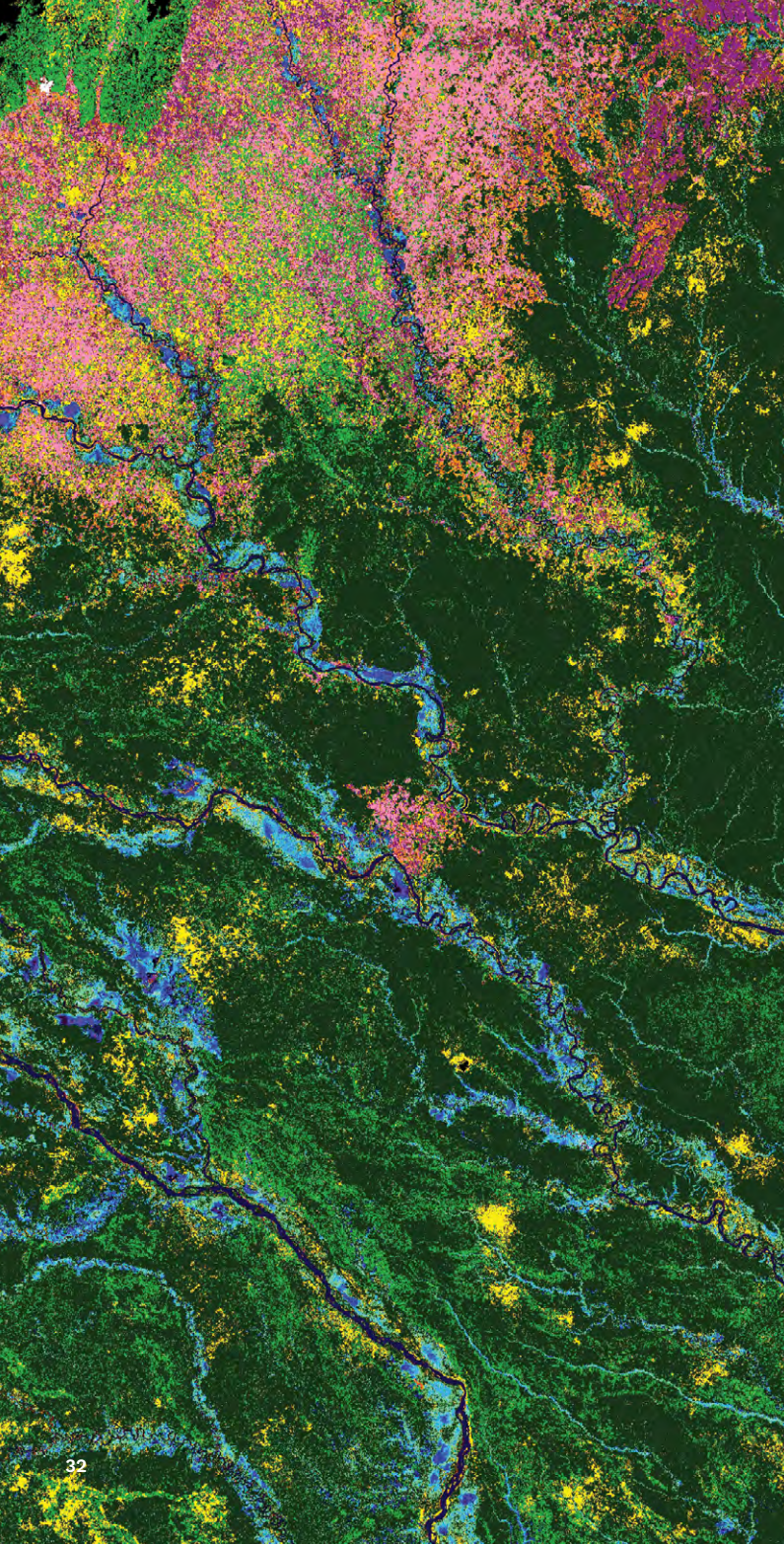
Para estas clases se hizo una interpretación de: 1) la estructura de la vegetación (niveles de biomasa y altura) interpretado del mapa de ecología del paisaje de Duivenvoorden and Lips, 1993, observaciones personales de los autores, fotografías georreferenciadas disponibles, y de los valores de las polarizaciones del radar Alos PALSAR-HV; 2) Las frecuencias con que se inunda, interpretado del mapa de frecuencias de inundación, y 3) el drenaje del suelo (interpretado del mapa de frecuencia de inundación como:

permanentemente inundado >10 veces, frecuentemente inundado entre seis y diez veces y ocasionalmente inundado entre una y cuatro veces). Adicionalmente se extrajeron los valores de NDVI para cada clase. Con esta información se procedió a generar el rótulo para cada clase y a generar la leyenda final utilizando el programa Land Cover Classification System (LCCS) para la clasificación, de esta manera nos aseguramos de que la nomenclatura final estuviera conforme con los parámetros definidos por la FAO (Di Gregorio & Jansen, 1998).

La figura 4 ejemplifica una opción para el cálculo de un rótulo de la leyenda LCCS. Se muestran las ventanas que van saliendo en el proceso de escogencia dicotómica, que resulta en un rótulo para cada clase. Se va entrando a las divisiones iniciales de la leyenda que son de tipo biofísicos: la primera entrada divide las áreas entre áreas con vegetación y sin vegetación. La entrada siguiente para ambos tipos tiene que ver con la localización del terreno, en zonas terrestres o en zonas con alguna influencia acuática o inundada. Si entramos, por ejemplo, a los tipos de vegetación inundada, podemos escoger entre diferentes opciones y una de ellas es la estacionalidad en las inundaciones. Luego podemos escoger el tipo de vegetación, su altura y porcentaje de cobertura de vegetación y el tipo de hojas. Con esta información ya se puede calcular un rótulo. Es posible adicionar información florística en caso de que esté disponible.

Figura 4: Ejemplo de las ventanas que se obtienen en el proceso de cálculo de un rótulo de la leyenda de vegetación LCCS, utilizando la información estructural disponible para cada una de las clases resultado de la clasificación de imágenes de sensores remotos.





Validación del mapa de estructuras de vegetación

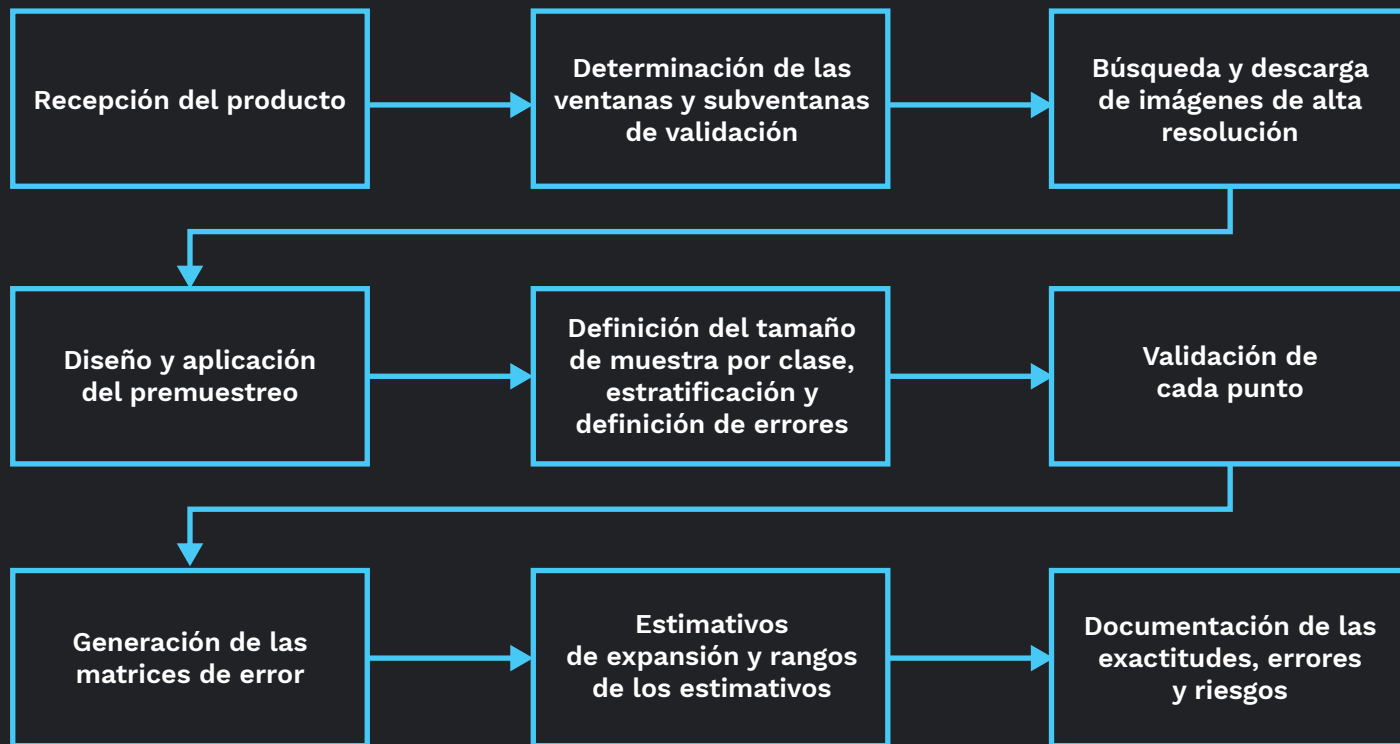
La validación proporciona la forma de evaluar la calidad de los mapas y la clasificación a partir de un indicador de exactitud que permite determinar si un ítem (pixel o polígono) está correctamente clasificado con respecto al universo en cuestión. Para este proyecto se utilizó un método indirecto de evaluación de la calidad de los datos geográficos, basado en estimaciones con fuentes consistentes, representativas y distintas a los propios datos, como lo son las imágenes de sensores ópticos de alta resolución WorldView-2. (Olofsson et al., 2014; Olofsson, et al. 2013).

Los pasos seguidos en la metodología de validación se presentan en la figura 5. El mapa de estructuras de vegetación fue el único que se validó de los tres mapas. El mapa cubre toda la zona de estudio y consta de quince clases de estructura de vegetación; para la validación se excluyó la clase doce, correspondiente a pendientes y las clases de bosque con los diferentes tipos de niveles de inundación.

La validación o evaluación de la exactitud temática de los productos generados no se llevó a cabo para toda el área de estudio. La precisión fue evaluada utilizando ventanas representativas para el área. Estas zonas se denominan “ventanas de análisis” y para su selección se tuvieron en cuenta los siguientes criterios: 1) Áreas que permitieran representar la diversidad en ecosistemas, utilizando el Mapa de Ecosistemas de la Amazonia colombiana de 2012 y

los estudios de ecología del paisaje del Medio de Caquetá (Duivenvoorden & Lips, 1993). 2) Zonas de interés para Amazon Conservation Team, especialmente áreas donde se concentran sus proyectos y estudios. 3) Áreas de interés con respecto a diversidad del paisaje y sitios de interés por cambios de cobertura. Se seleccionaron en total trece ventanas de análisis (Figura 6) que ocupan 98.977,23 km², lo que corresponde al 16 % del área de estudio.

Figura 5: Metodología general de validación. Siguiendo las metodologías de Olofsson et al., 2014; Olofsson, et al. 2013, Cochran, 1977.



Se procedió a buscar las fuentes de información, para la comparación que se usara en la validación. Se utilizaron imágenes de alta resolución de WorldView, que son disponibles para Amazon Conservation Team para toda la Amazonia. También se decidió usar imágenes de alta resolución disponibles en GoogleEarth o en BingSatellite, en caso de presentar cobertura de nubes o de necesitar corroboraciones adicionales.

Luego se procedió a realizar el muestreo, que es muestreo y validación de todas las clases usando pocas muestras, con el fin de utilizar la precisión obtenida por clase, la proporción de área cubierta por esa clase y el error muestral deseado para cada clase, para la definición de la cantidad de puntos totales a validar. Se ajustó el error de muestreo entre el 1 % y el 2 % y un nivel de confiabilidad de 1,96 y se obtuvo un total de

54.972 puntos repartidos entre las catorce clases. La validación se llevó a cabo inspeccionando visualmente punto a punto y tomando como referencia una imagen de alta resolución, que para el caso son imágenes del repositorio de Arcgis, Imagine, Alos Palsar e imágenes WorldView. La figura 7 muestra un ejemplo de las interpretaciones hechas sobre las imágenes de alta resolución, para cada uno de los puntos escogidos al azar sobre todo el mapa. La figura 8 muestra la localización de los puntos generados al azar para la validación de todas las imágenes.

Se generaron las matrices de error y se calcularon los estimativos de expansión para la validación y los rangos de los estimativos según lo explica Olofsson et al., 2014. La validación se documentó y se discutieron algunos puntos de interés.

Figura 6: Localización de las ventanas escogidas para el proceso de premuestreo y cálculo de la muestra total para la validación del mapa. En esta primera etapa de la validación se establece el número de la muestra final por clase, con base en el número total de pixeles para esa clase, el nivel de precisión deseada y el error de muestreo definido para cada clase.

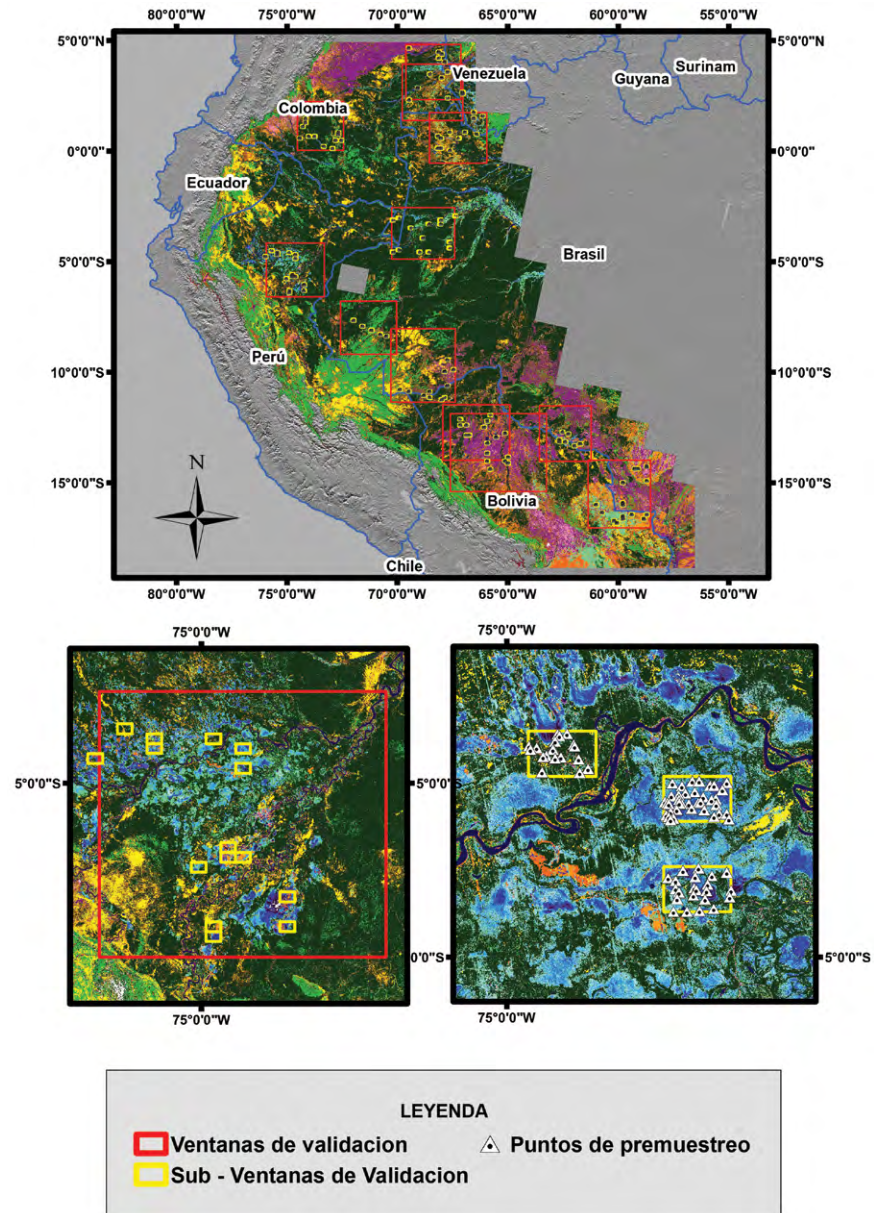
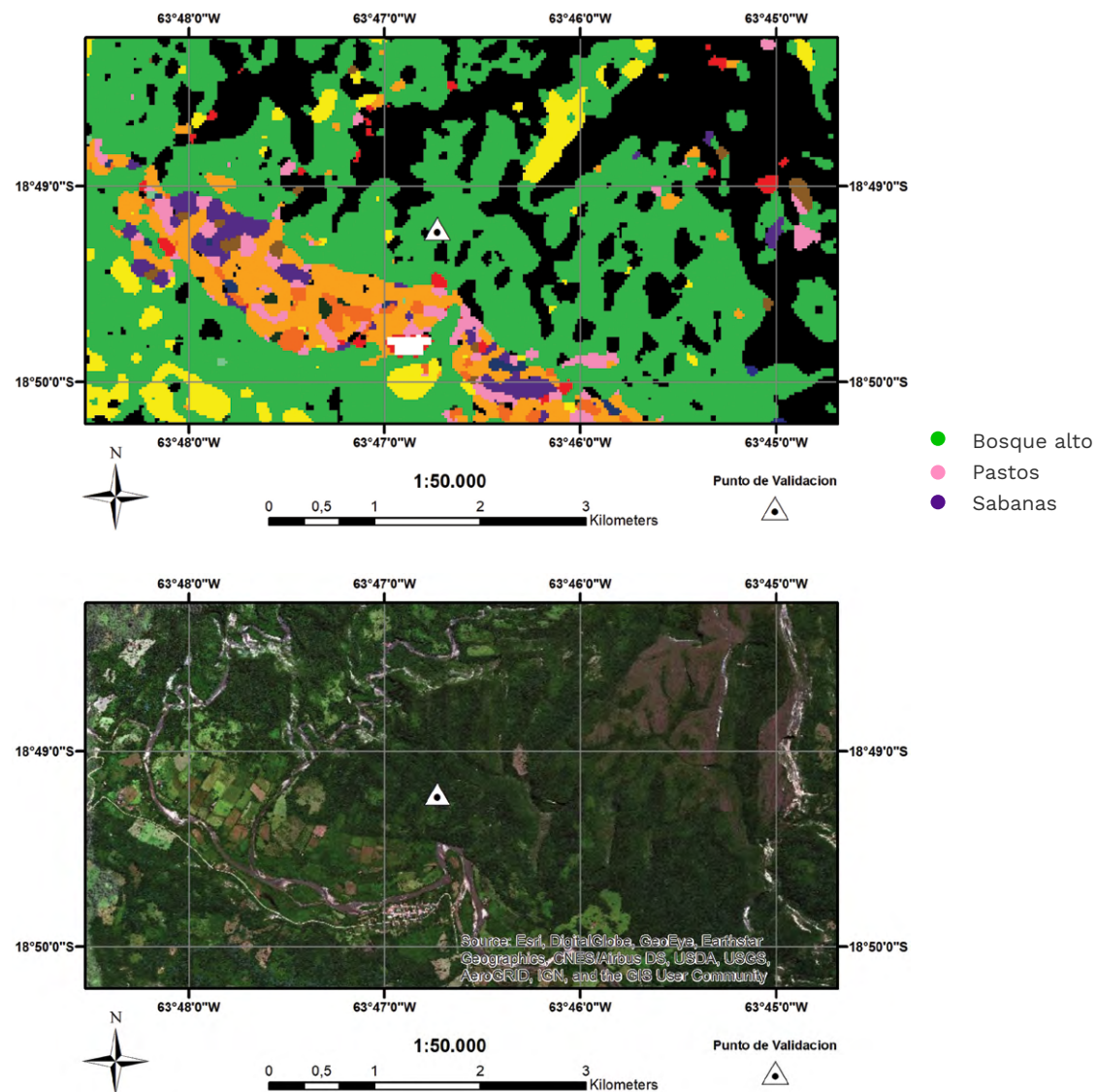


Figura 7: Ejemplo de la interpretación entre las clases del mapa y las imágenes de alta resolución.



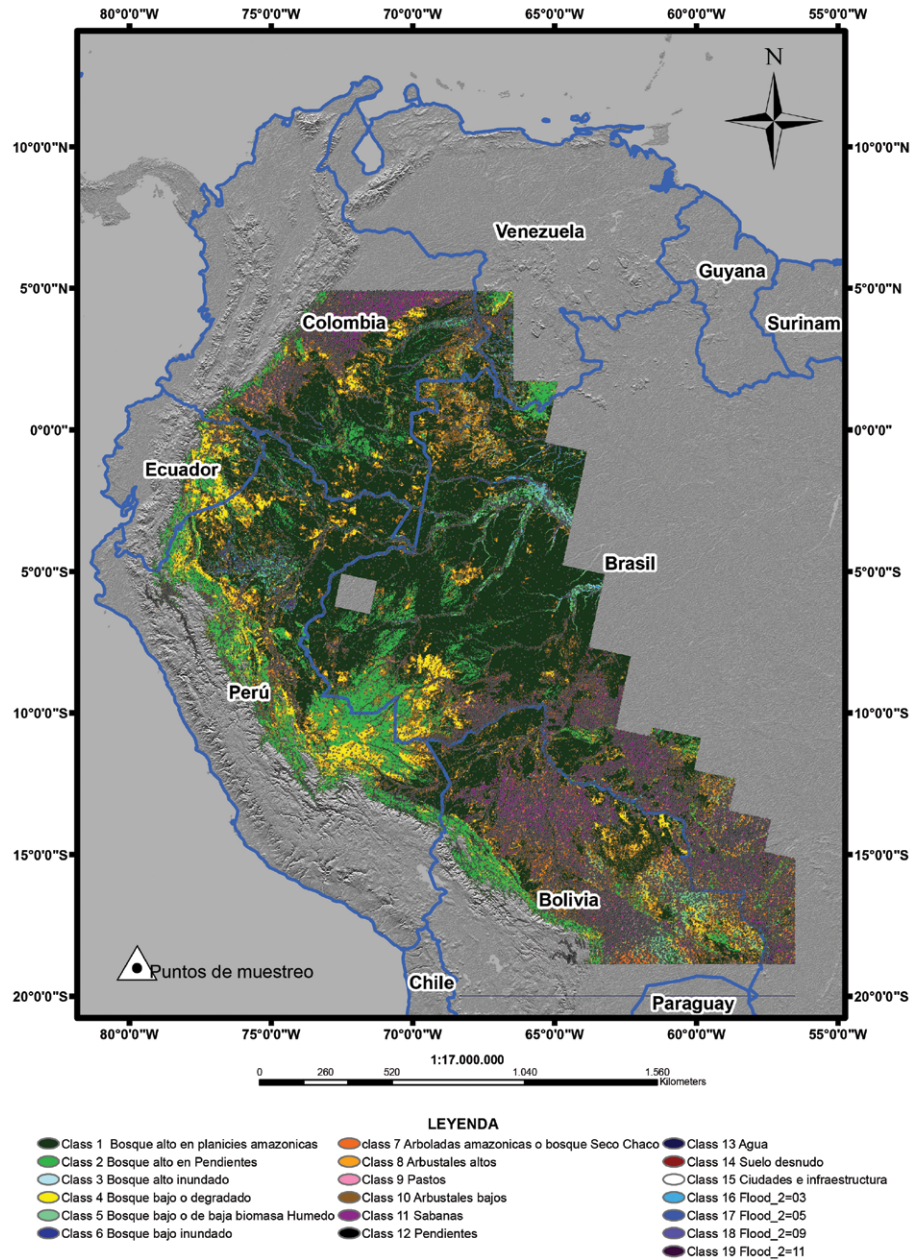
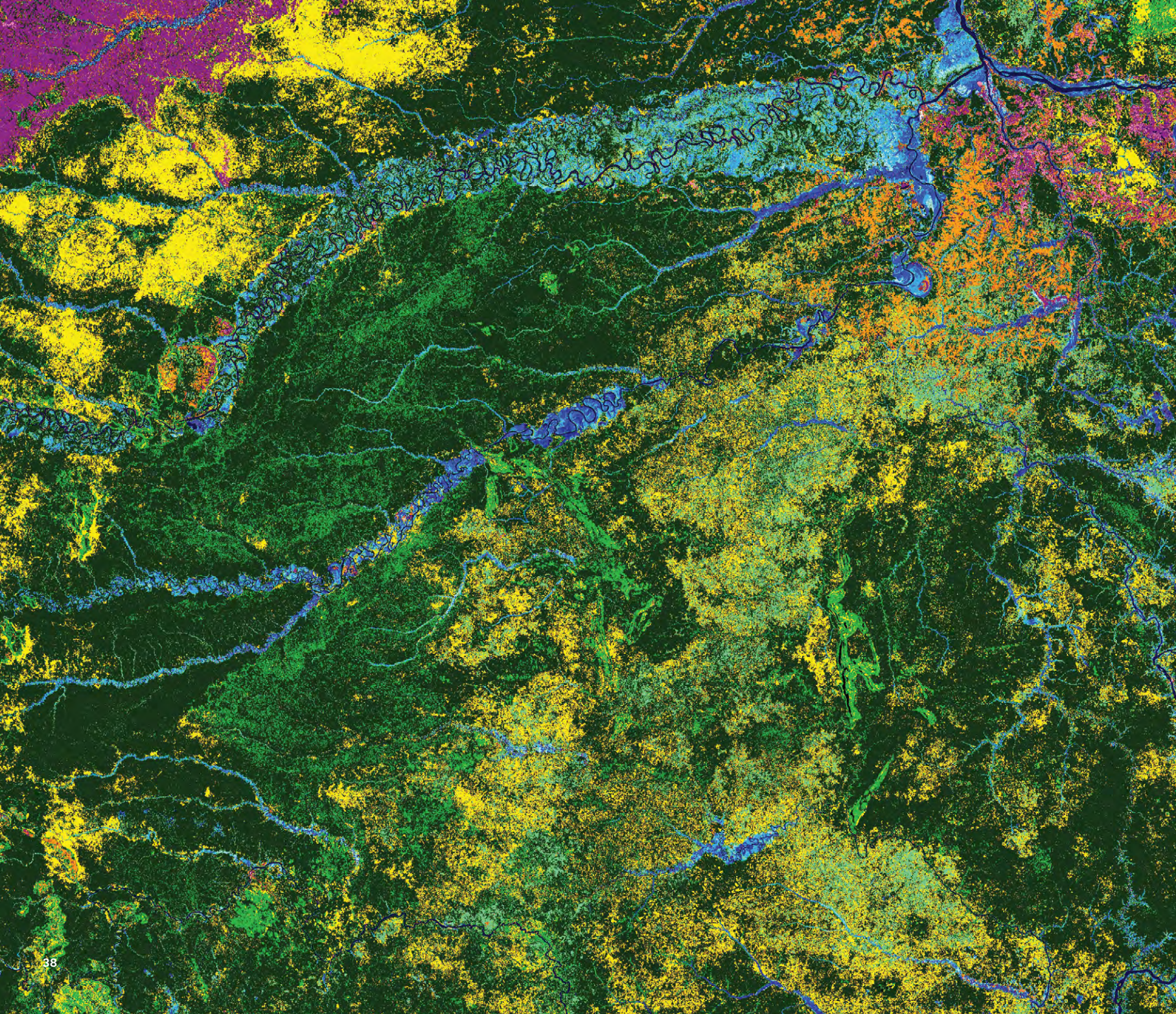


Figura 8: Localización de los puntos generados aleatoriamente para realizar la validación de toda la zona de estudio. Cada punto fue revisado visualmente y se identifica como correcto o erróneo. Los resultados finales sirven para calcular las matrices de error y calcular las precisiones del productor y del usuario, y la precisión total del mapa.



Resultados

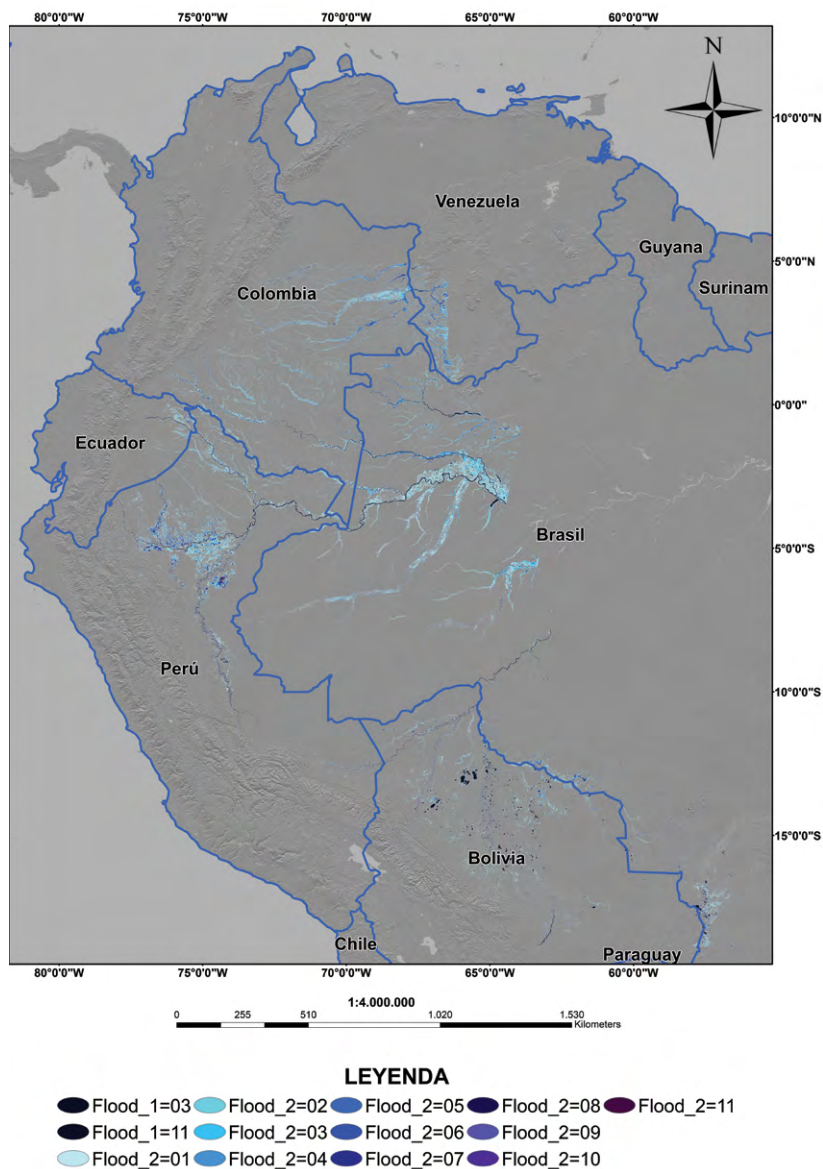
Los mapas

Tres aspectos se consideraron de importancia en la definición de una línea base para la observación a largo plazo de un Bioma: 1) La distribución del agua y la frecuencia de su ocurrencia; 2) La vegetación y la diversidad de los paisajes, y 3) Los cambios generados por eventos naturales o inducidos por el hombre tales como deforestación. Para la observación de estos aspectos se generaron tres mapas diferentes e independientes. Cada mapa se puede usar por sí solo, pero también se pueden combinar y obtener información más definida. En este caso se unieron los mapas de vegetación y de frecuencias de inundación y obtuvimos un mapa adicional con 19 clases, que tiene más información sobre los tipos de vegetación inundada y se puede considerar como un mapa de unidades ecológicas.

Mapa de frecuencias de inundación

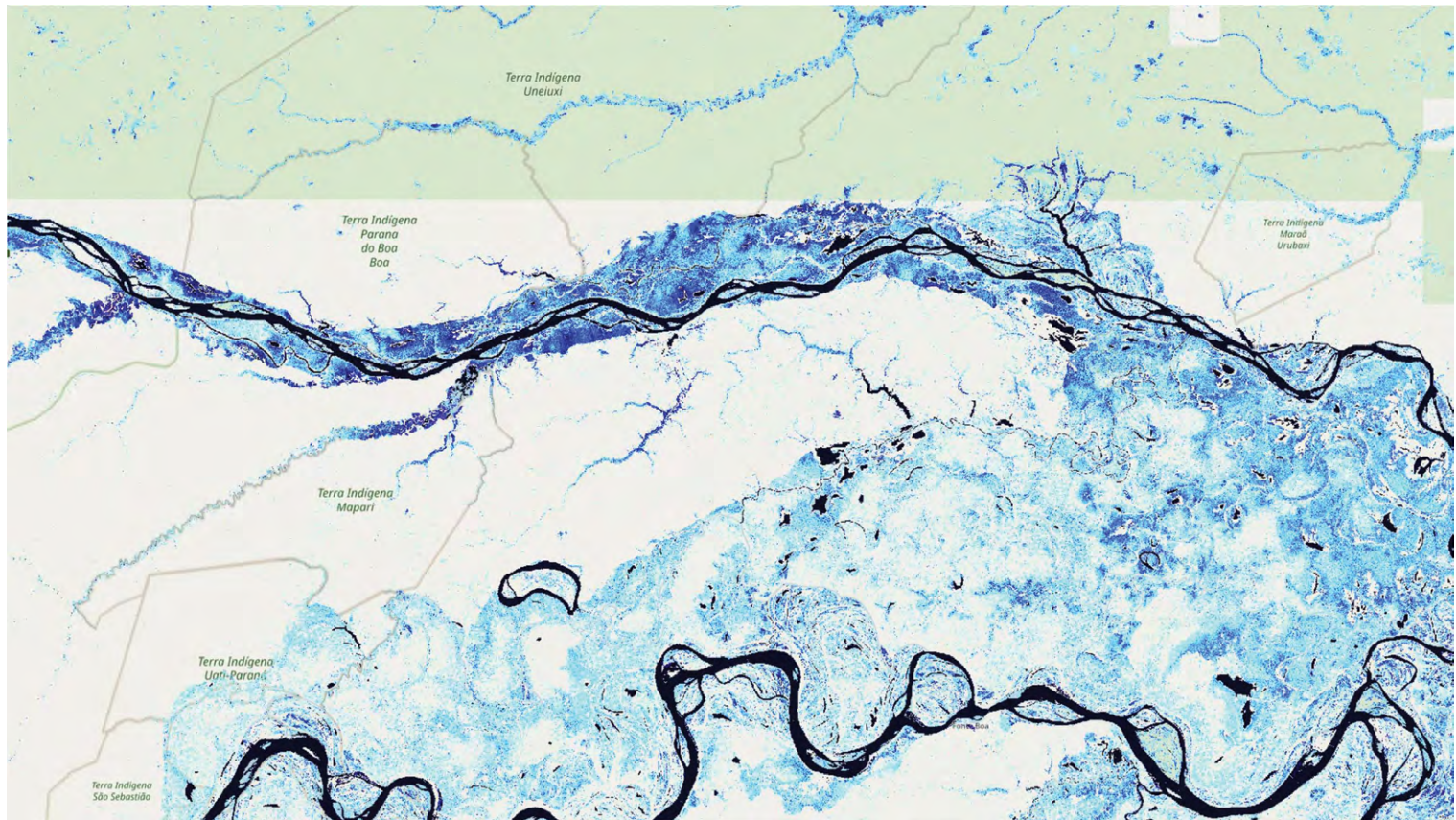
Este mapa es uno de los más sorprendentes realizados en este proyecto ya que muestra la extensión cubierta por el agua en el territorio estudiado. Se realizó un estudio de las imágenes de radar disponibles por diez años. Para estas imágenes se definió si cada pixel estaba o no inundando, de acuerdo con dos posibles clases temáticas: 1) Inundación a cielo abierto o 2) Inundación bajo dosel. Estos mapas se compilaron en uno solo y se obtuvo un mapa de frecuencias de inundación con dos clases de inundación a cielo abierto y once clases de frecuencias de inundación bajo dosel. El valor de cada pixel corresponde al número de veces que ese pixel fue detectado inundado en la serie de tiempo. La leyenda del mapa muestra las trece clases, en diferentes niveles de azul: desde el más oscuro, que indica que ese pixel fue detectado inundado con mayor frecuencia. El mapa final se muestra en la figura 9. La figura 10 muestra un detalle para las zonas de las varzeas del humedal de Mamirauá en Brasil.

Figura 9: Mapa de frecuencias de inundación para la Amazonia occidental.



El área total inundada, calculado del número de píxeles clasificados con alguna inundación, fue de 330.802.64 km², que corresponde al 9,34 % de todo el territorio mapeado (excluida Venezuela).

Figura 10: Detalle de mapa de frecuencias de inundación para la zona de Mamiraua en Brasil.



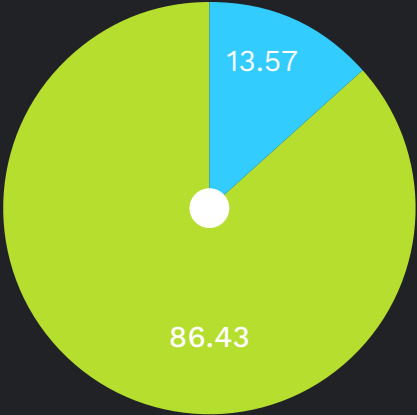
Para cada país se hizo lo siguiente: Para el análisis de la distribución y la temporalidad en la ocurrencia del agua se calcularon los porcentajes de área inundada vs. la no inundada. Se generaron diagramas de porcentajes para ilustrar los resultados. En general las proporciones inundadas variaron entre el 4,2 % (Bolivia) y el 16,7 % (Brasil). Para estudiar las áreas cubiertas por las diferentes frecuencias de inundación, se calcularon

los porcentajes cubiertos por las diferentes frecuencias de inundación. Para hacer el análisis más comprensivo se agruparon las frecuencias de inundación en cinco clases: 1) Inundación a cielo abierto (clases 1 y 2); 2) Inundación estacional (clases 4, 5 y 6); 3) Inundación frecuente (clases 6, 7 y 8); Inundación permanente 1 (clases 9 y 10) y 4) Inundación permanente (clases 11, 12, y 13). Los estimados en porcentajes se presentan en la figura 11.

Figura 11: Porcentajes de inundación calculados para los territorios amazónicos mapeados por país, y los porcentajes de frecuencias de inundación agrupadas por clases, calculadas para la porción inundada de cada país encontradas.

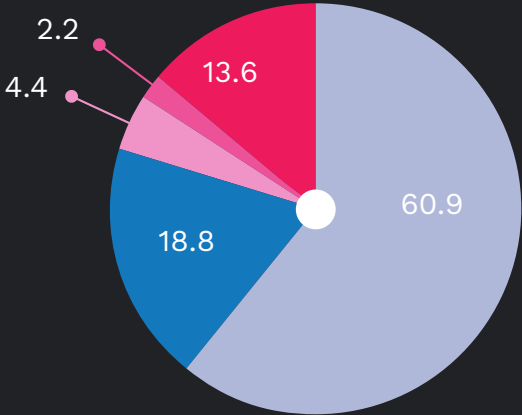
- % inundado
- % no inundado
- Cielo abierto
- Estacional
- Frecuente
- Permanente 1
- Permanente 2

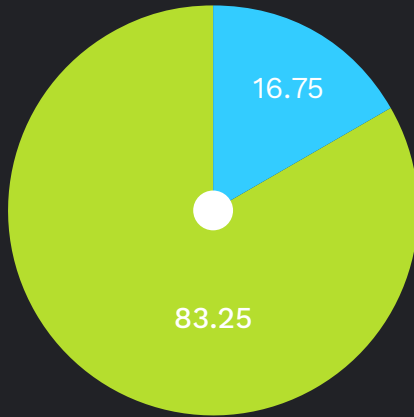
Porcentaje de territorio inundando:



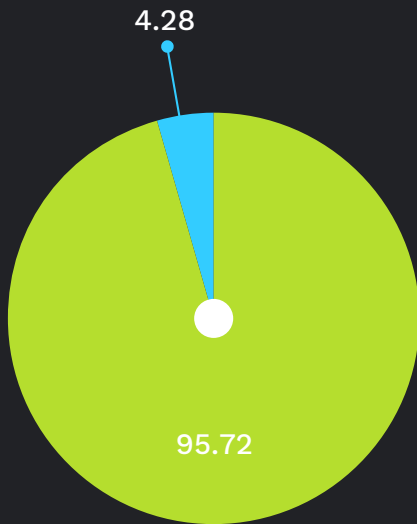
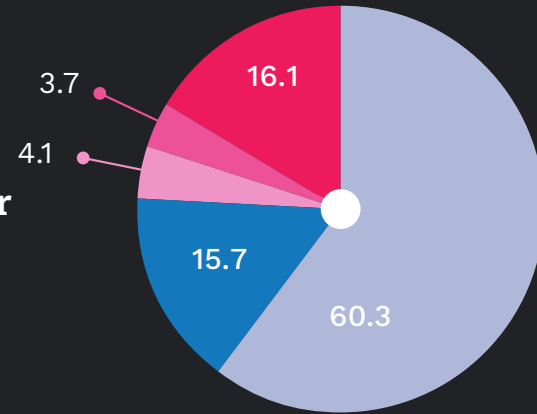
Porcentajes cubiertos por los tipos de inundación:

Colombia

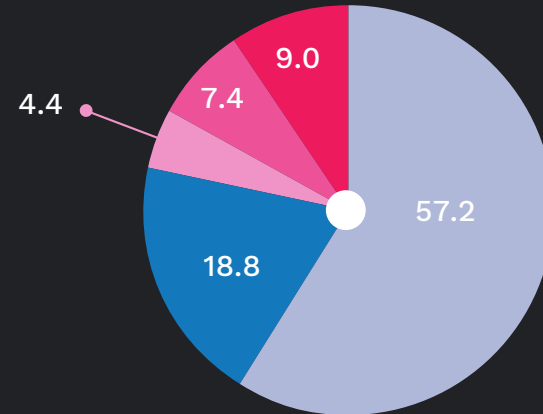


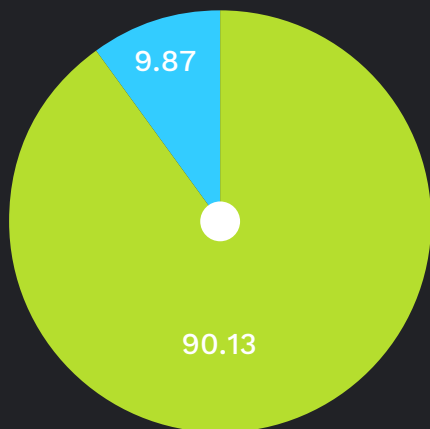


Ecuador

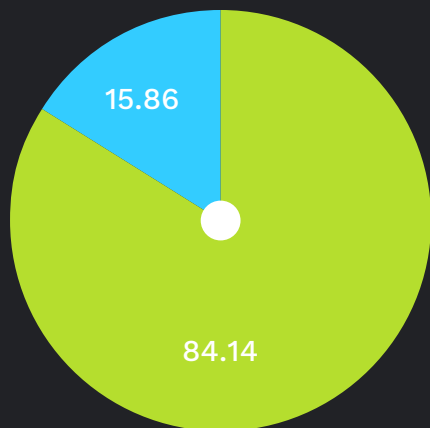
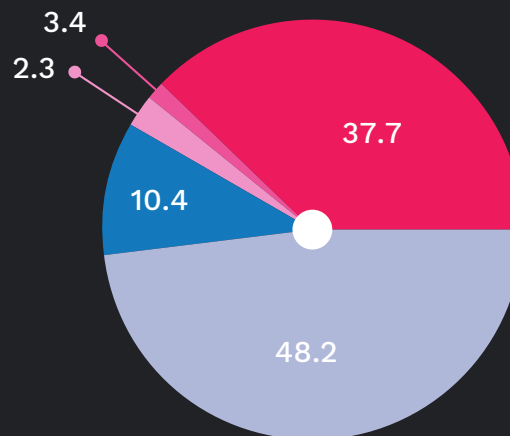


Perú

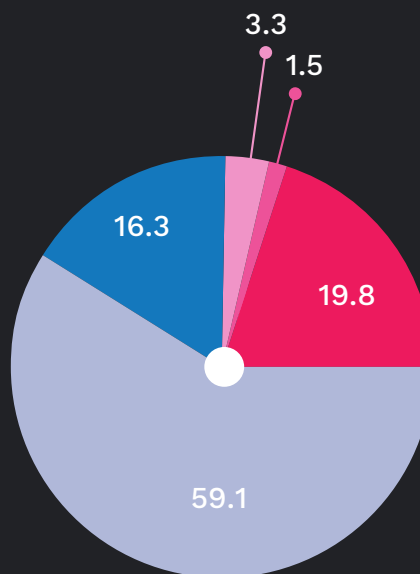




Bolivia



Brasil



- % inundado
- % no inundado
- Cielo abierto
- Estacional
- Frecuente
- Permanente 1
- Permanente 2

Mapa de tipos estructurales de vegetación

El mapa final de los tipos estructurales de vegetación se presenta en la figura 1. El bosque alto de planicies amazónicas fue la clase predominante en toda el área, seguida del bosque alto en pendientes y del bosque degradado. Las proporciones para todas las clases se pueden ver en la figura 12. Es de notar que las proporciones de las clases de bosque inundadas (clase 3 y 6) son menores a las calculadas con el mapa de

frecuencias de inundación. Esto es de esperarse ya que el mapa de frecuencias está basado en diez años de observación, mientras que para la clasificación de mapa de estructuras de vegetación sólo se usaron los insumos correspondientes al año 2017. Esto significa que las clases inundadas que aparecen en el mapa de vegetación son un porcentaje menor de la inundación total detectada en diez años.

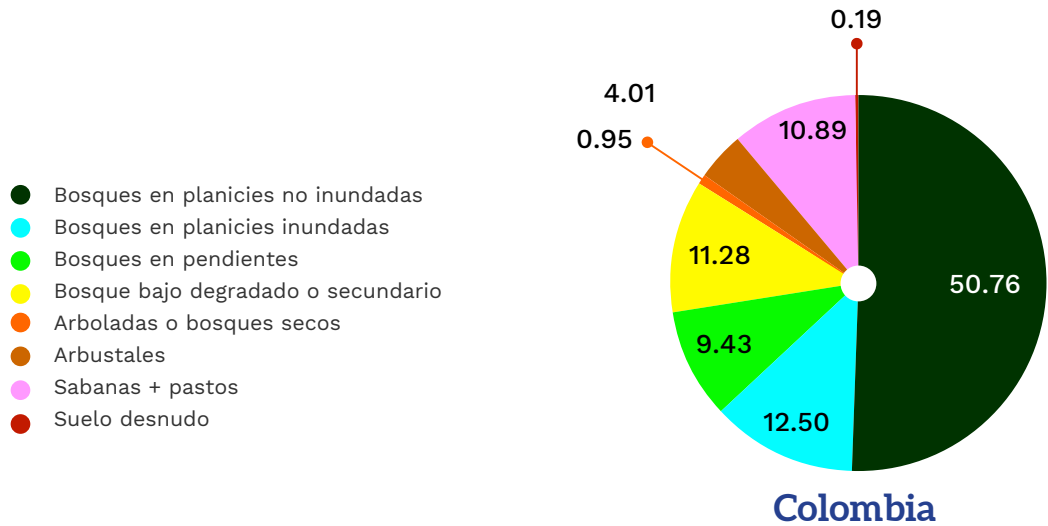
Tabla 4: Leyenda final del mapa de estructuras de vegetación para la amazonia occidental, áreas cubiertas por cada clase de porcentajes de cobertura.

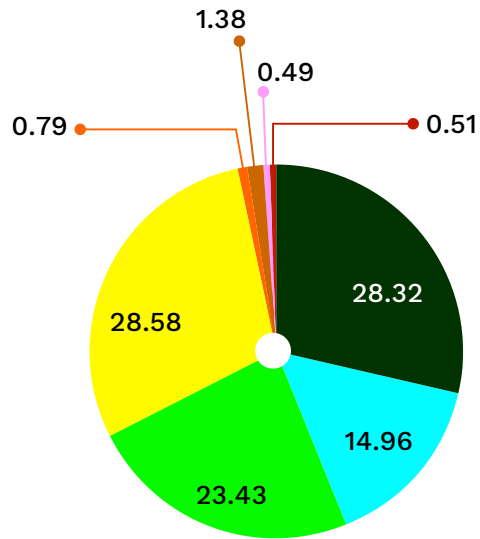
		Km ²	%
1	Bosque alto en planicies amazónicas	1.808.479,21	50,22
2	Bosque alto en pendientes	464.456,22	12,90
3	Bosque alto inundado	21.460,52	0,60
4	Bosque bajo o degradado	452.327,44	12,56
5	Bosque bajo o de baja biomasa húmedo	95.372,77	2,65
6	Bosque bajo inundado	46.638,82	1,30
7	Arboladas amazónicas o bosque seco Chaco	86.492,29	2,40
8	Arbustales altos	153.928,67	4,27
9	Pastos	89.657,34	2,49
10	Arbustales bajos	30.696,89	0,85
11	Sabanas	224.561,22	6,24
12	Pendientes	64.601,32	1,79
13	Agua	49.887,2	1,39
14	Suelo desnudo	11.356,01	0,32
15	Ciudades e infraestructura	1.532,00	0,04
Total		3.601.447,83	100,00

Las proporciones de las clases se calcularon para todos los países. Se agregaron las áreas en clases estructurales básicas para dar facilidad en las interpretaciones (las clases 12, 13 y 15 fueron excluidas de estos cálculos): 1) Bosques en Planicies amazónicas no inundados (clase 1); 2) bosque e Planicies inundadas

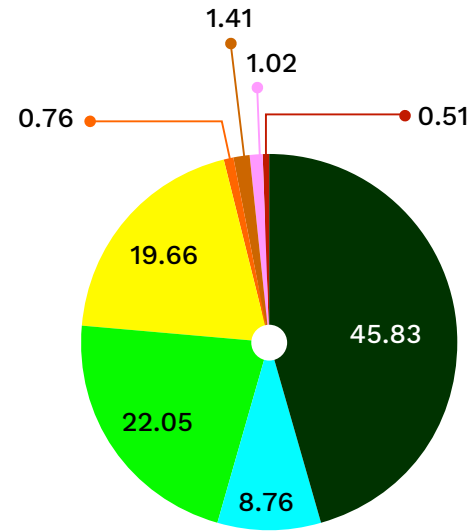
(clases 3 y 6); 3) Bosques en pendientes (clase 2); 4) Bosques bajo, degradado o secundario (clases 4 y 5); 5) Arboladas o bosques secos (clase 7); 6) Arbustales (clases 8 y 10); 7) Sabanas y Pastos (clases 9 y 11) y 8) Suelo desnudo (clase 14).

Figura 12: Porcentajes de cobertura de los tipos estructurales básicos de vegetación calculados del mapa de de tipos estructurales de vegetación de la Amazonia occidental.

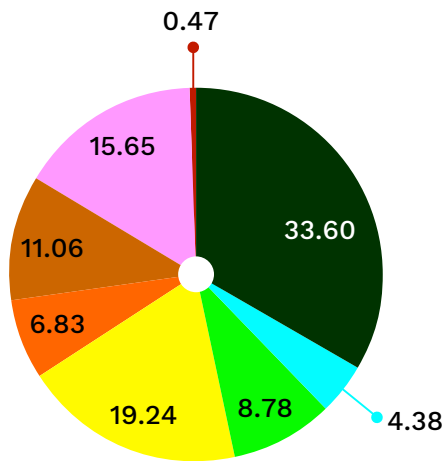




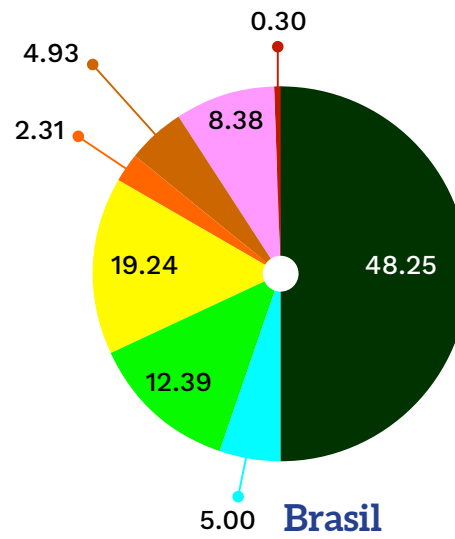
Ecuador



Perú



Bolivia



Brasil

En general los tipos de vegetación mas comunes en todos los países son los bosques en planicies no inundados, seguidos de los bosques en pendientes y los bosques inundados. Para Bolivia se calcula un gran porcentaje del área en la clase pastos y sabanas y en arboladas o bosques secos. En Brasil la proporción de sabanas pastos también es alta, lo que presumimos es debido a los procesos de transformación ocurridos en esas zonas fronterizas. También es interesante observar que para Ecuador la proporción de bosque bajo o degradado es considerable.

Mapa de cambio de cobertura

Un detalle del mapa de cambio de cobertura de vegetación cerca a Santa Cruz de la Sierra, en Bolivia, se puede observar en la figura 13. La leyenda del mapa muestra ocho clases, de las cuales dos muestran los cambios de cobertura debidos a deforestación detectados para

los períodos 2007-2010 y 2010-2017. Estos períodos nos sirven como un indicativo de los procesos ocurridos en diez años y para evaluar tendencias en el cambio de la cobertura boscosa, sin embargo, no deben ser interpretados como valores absolutos ni cálculos absolutos de deforestación. Esto es básicamente debido a dos razones: la primera es que los períodos de observación son de cuatro y siete años, respectivamente, que son lo suficientemente largos para que ocurran procesos de regeneración o de otros cambios de cobertura debido a las dinámicas de cambio. Segundo, lo que realmente está registrado en el mapa es el cambio en la cobertura de bosque ocurrido de un período a otro, es decir, no sabemos si el cambio viene de la deforestación de un bosque primario, o de un bosque secundario o de un rastrojo. Para hacer un estimativo de la deforestación se debería tener un período máximo de un año considerando que es el tiempo mínimo en el que los cambios debido a las dinámicas permiten detectar la deforestación.

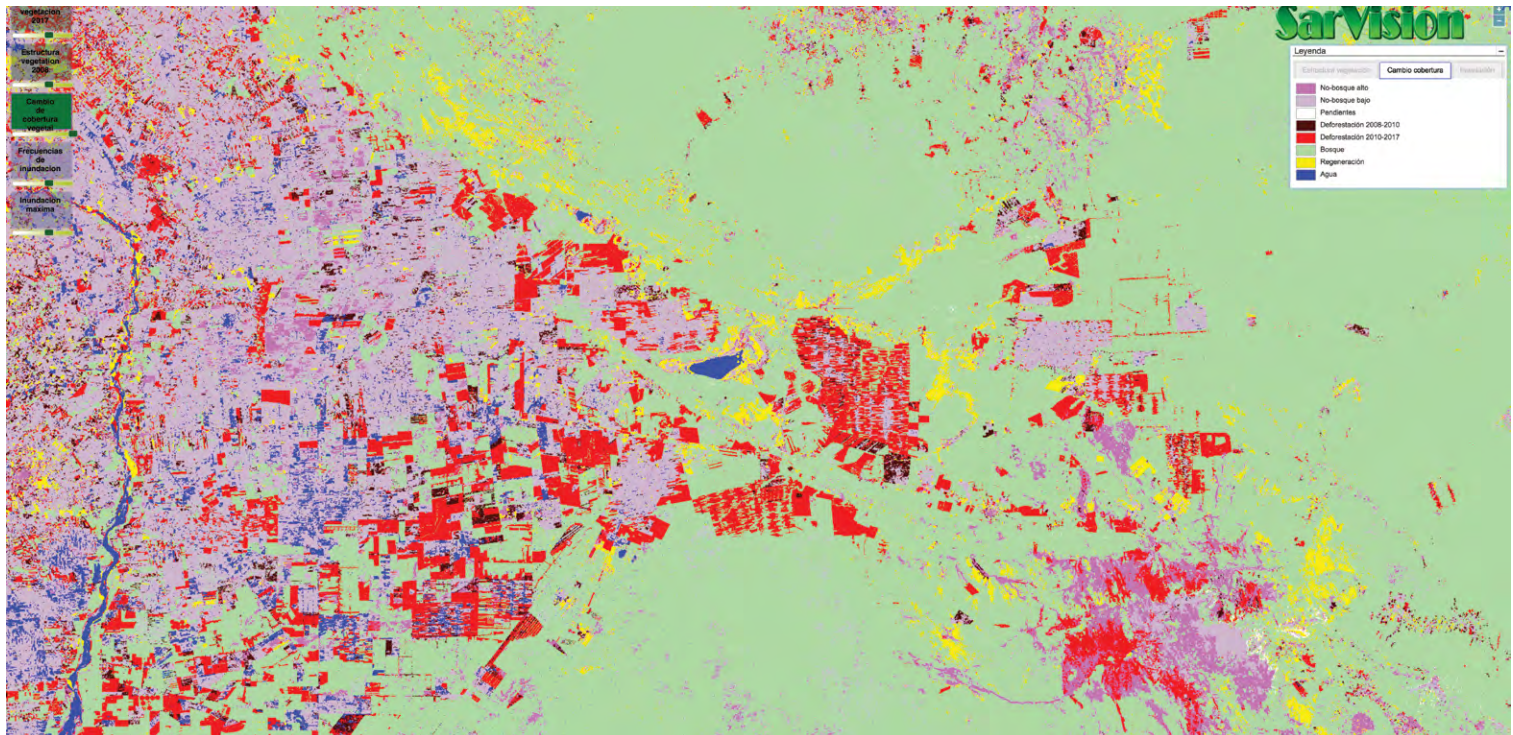


Figura 13: Detalle Mapa de Cambio de cobertura de vegetación 2007-2017 para la Amazonia occidental, cerca a Santa Cruz de la Sierra, en Bolivia. Zona de alta deforestación debido a agricultura extensiva.

La figura 14 muestra las áreas totales deforestadas por país en el período de observación. Es claro que los mayores cambios de cobertura ocurrieron en Brasil y Bolivia para ambos períodos de tiempo. La figura 15 muestra los porcentajes deforestados, relativos al área de cada país, durante el período de estudio. En general en el área de estudio cambió de cobertura de bosque a no bosque en un 4,5 % del territorio.

Figura 14: Área total deforestada por país en diez años de observación

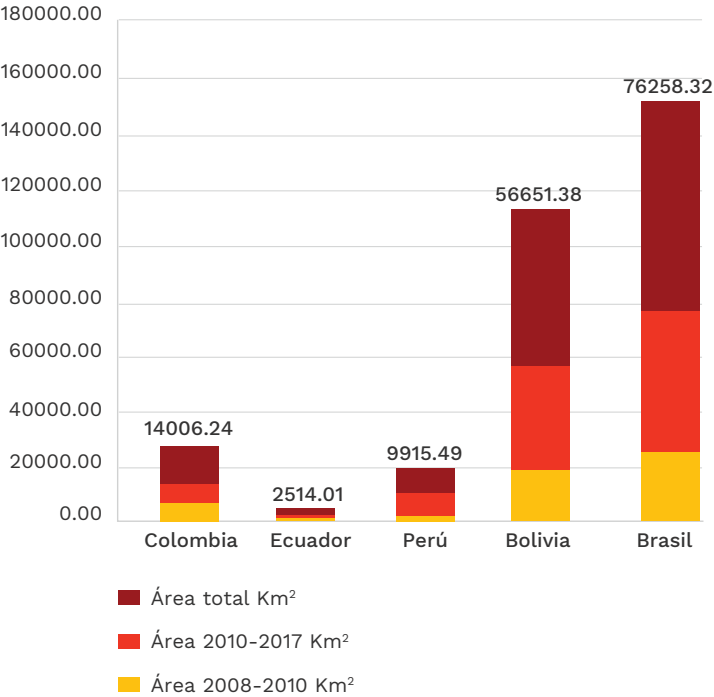
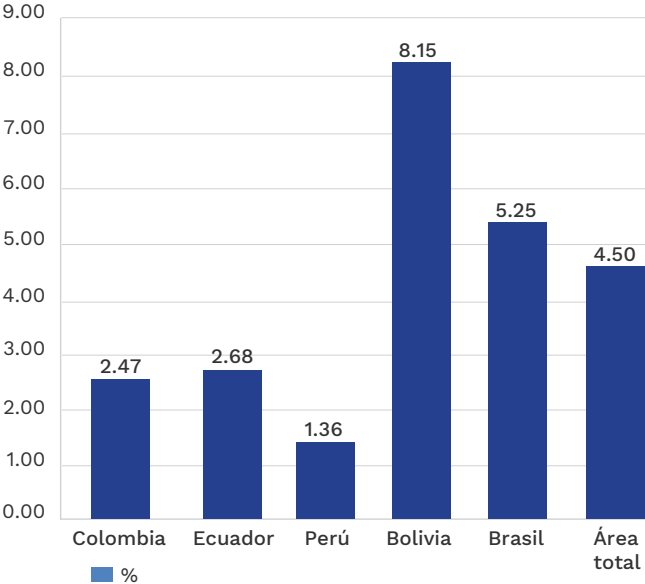


Figura 15: Porcentaje del área amazónica por país deforestada en diez años de observación



La sinergia de los mapas - Los ecosistemas

Una de las aplicaciones de esta línea base es la posibilidad de unir los mapas de frecuencias de inundación y los de estructura de vegetación para obtener información sobre las unidades ecológicas, según la definición dada por Duivenvoorden and Lips, 1993 (ver figura 2). La incorporación del mapa de frecuencias de inundación con el mapa de estructuras de vegetación nos amplía la leyenda y nos da más información y definición de las clases inundadas.

Tabla 5: Leyenda y cualidades estructurales del mapa de unidades ecológicas generado al unir el mapa de tipos estructurales de vegetación y el mapa de frecuencias de inundación. Parte de los atributos estructurales fue publicada por Duivenvoorden and Lips, 1993, complementada con mediciones y observaciones personales de Quiñones, 2002.

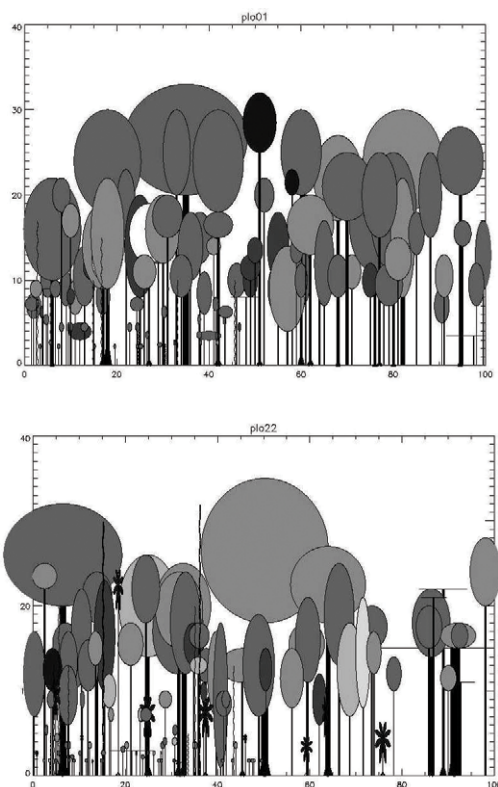
		Altura (m)	Biomasa (Ton/ha)	Árboles /0.1 ha	Árboles /0.1 ha	Palmas /0.1 ha
1	Bosque alto en planicies amazónicas	25-30	320-360	65-75	65-75	3-6
2	Bosque alto en pendientes	20-25	180-200	70-75	70-75	5-10
3	Bosque alto inundado estacionalmente	20-25	200-250	40-45	40-45	1-6
4	Bosque bajo o degradado o en proceso de sucesión	15-20	100-150	110-130	110-130	2-12
16	Bosque medio de palmas inundado ocasionalmente, en suelos mal drenados	18-24	230-270	90-100	90-100	8-10
17	Bosque medio de palmas inundando casi frecuentemente o con suelos saturados	18-20	180-220	50-70	50-70	25-35
5	Bosque bajo o de baja biomasa, campinaranas o bosque seco	7-12	80-100	30-50	30-50	2-5
6	Bosque bajo inundado estacionalmente	8-11	80-120	80-120	80-120	10-15
18	Pantanos de vegetación media inundados casi permanentemente	14-16	120-150	80-100	80-100	12-18
19	Pantanos de vegetación baja inundados permanentemente	6	50	12	12	9
7	Arboladas amazónicas o bosque seco Chaco	10-15	100-150	20-50	20-50	1-3
8	Arbustales altos	8-10	50-100	1-5	1-5	-
9	Pastos	0.3	15-30	1-5	1-5	-
10	Arbustales bajos	3-8	30-60	8-10	8-10	-
11	Sabanas	0.5	10-20	5-8	5-8	-

Incluyendo la información reportada por Duivenvoorden and Lips, 1993, observaciones y mediciones de campo hechas por Quiñones, 2002, y el conocimiento general de los autores sobre el paisaje de la Amazonia occidental, podemos reclasificar el mapa, con una leyenda de tipo ecológico uniendo información estructural y fisionómica con las frecuencias de inundación. La tabla 5 muestra la leyenda final del mapa, con un total de 19 clases. La Figura 16 muestra el mapa de unidades ecológicas.

A continuación haremos una descripción muy breve de estas unidades ecológicas con su correspondiente perfil de vegetación:

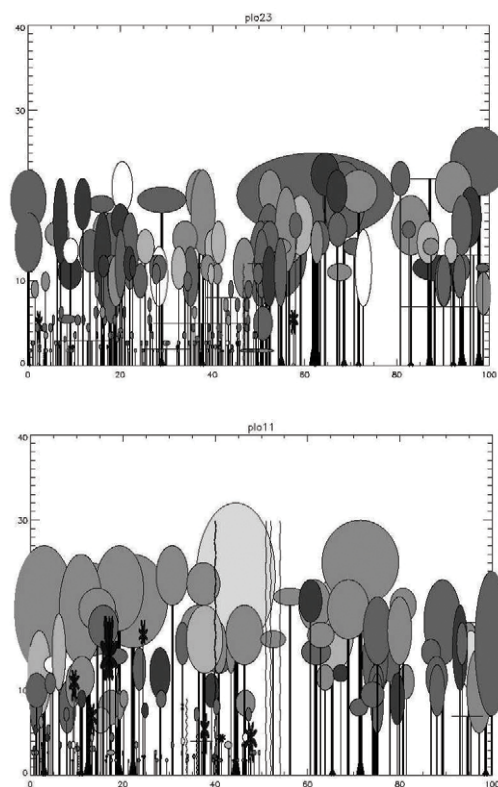
1. Bosque alto en planicies amazónicas:

Bosque alto, de alta biomasa, dosel cerrado, algunas palmas, sotobosque abierto y alta densidad de árboles que ocurre en planicies terrazas de ríos andinos y amazónicos. Ocurre en áreas bien drenadas.



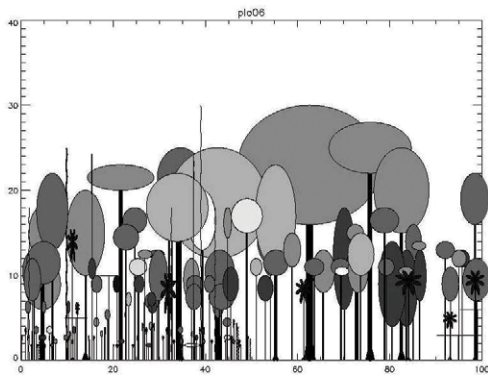
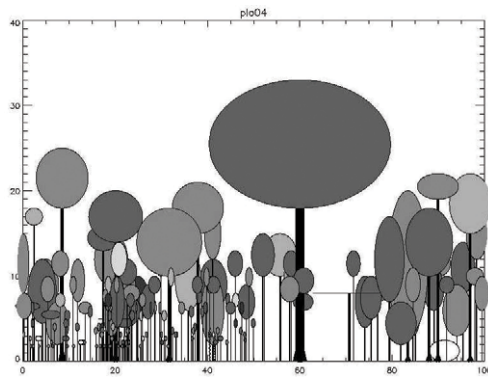
2. Bosque alto en pendientes:

Bosque alto, de dosel cerrado, no inundado que ocurre en pendientes amazónicas, con alta biomasa, alta densidad de árboles y arbolitos y algunas palmas.



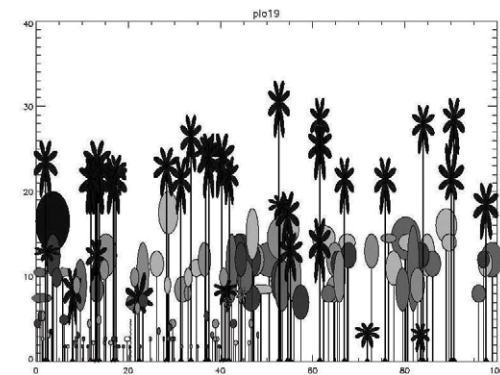
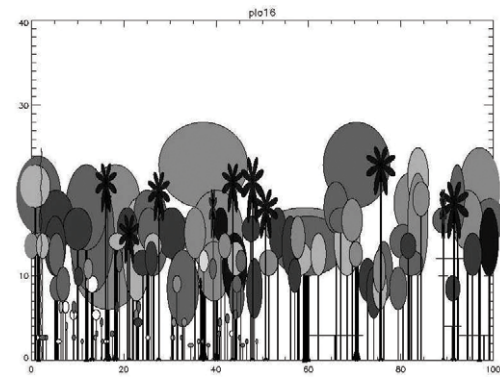
3. Bosque alto inundado estacionalmente:

Bosque alto de biomasa media, con densidad media de árboles y arbolitos con algunas palmas. Ocurre en suelos bien drenados, pero es sujeto a inundaciones estacionales.



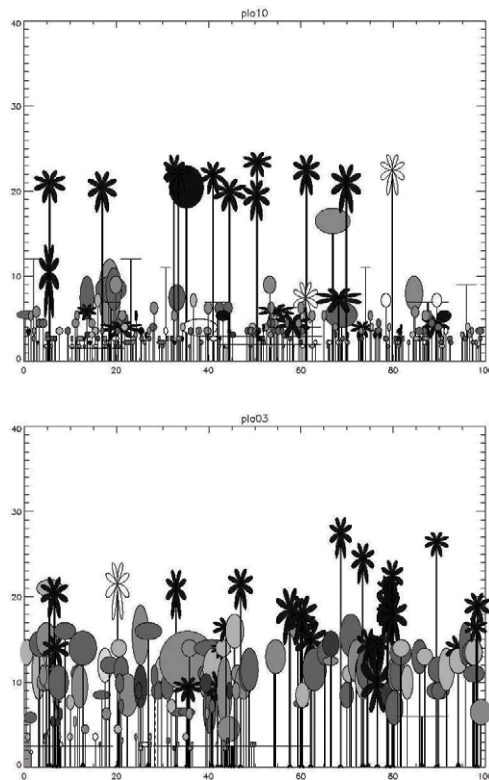
16. Bosque medio de palmas inundado ocasionalmente, en suelos mal drenados:

Bosque de biomasa alta y densidad alta de árboles y palmas, ocurre en suelos mal drenados o anegados.



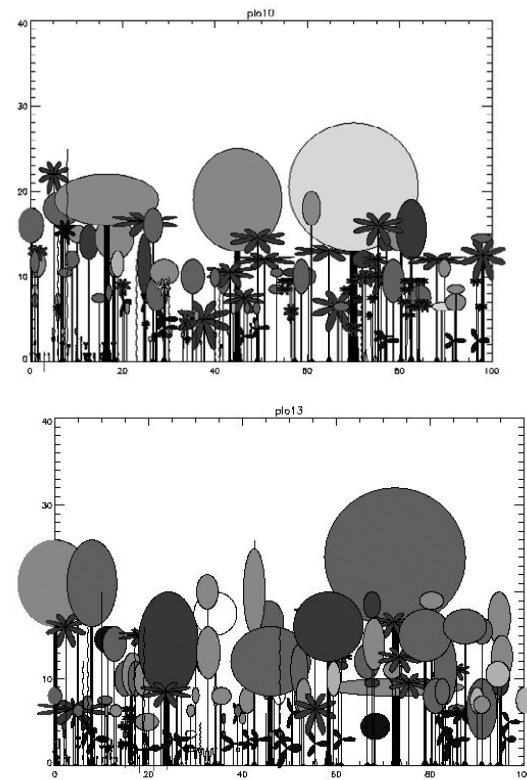
17. Bosque medio de palmas inundando casi frecuentemente o con suelos saturados:

Bosque de biomasa media con alta densidad de palmas y arbolitos.



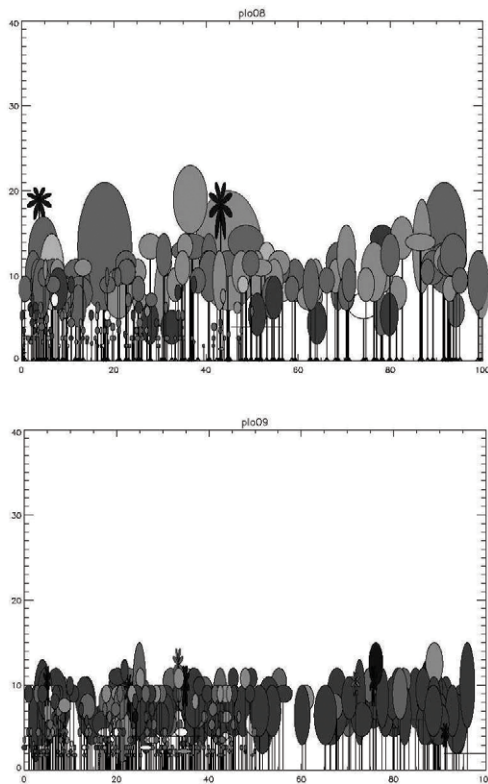
4. Bosque bajo o degradado o en proceso de sucesión:

Bosques bajos de biomasa media con alta densidad de árboles, palmas en sotobosque crece en suelos pobres, degradados por actividad humana.



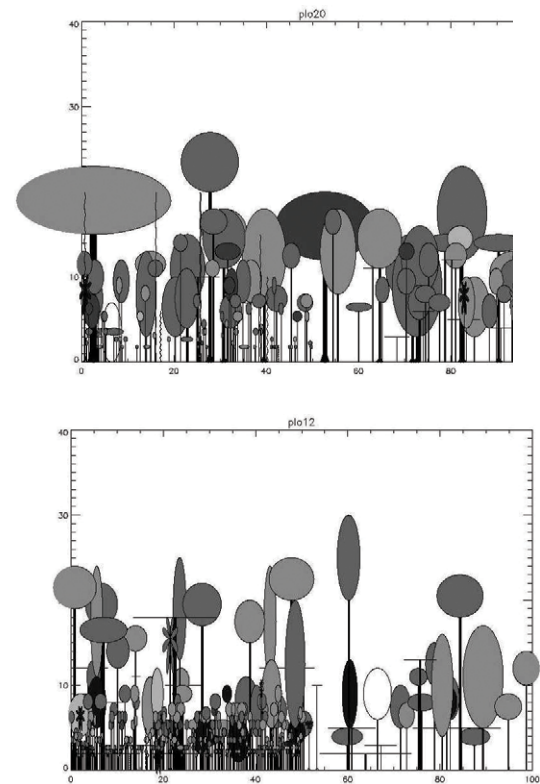
5. Bosque bajo o de baja biomasa, campinaranas o bosque seco:

Bosques bajos, con alta densidad de arbolitos y algunas palmas. Crece en suelos muy pobres o sobre arenas blancas. Esta estructura también se puede encontrar en bosque secos más septentrionales en Bolivia y Perú.



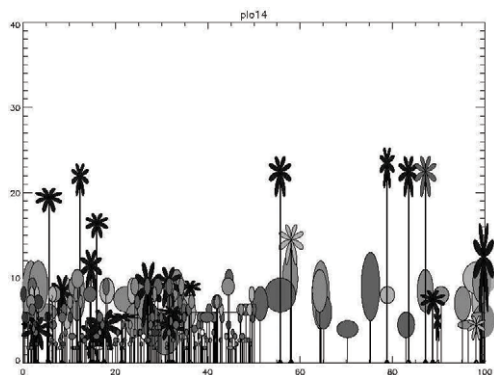
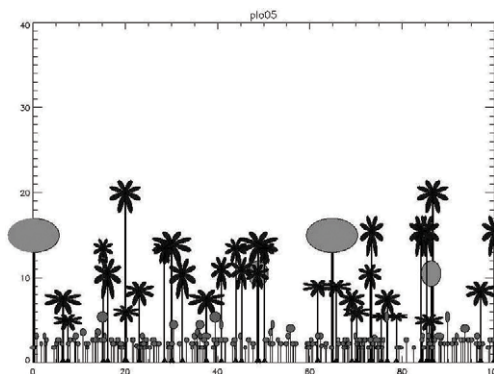
6. Bosque bajo inundado estacionalmente:

Bosque Bajo, de biomasa media-baja con mucha densidad de arbolitos, inundado estacionalmente y crece sobre suelos pobres.



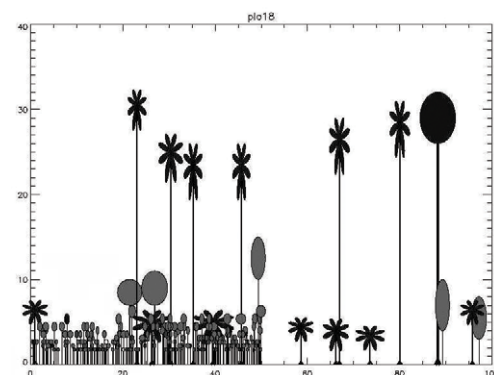
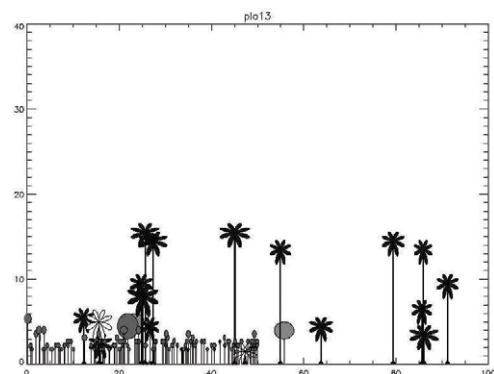
18. Pantanos de vegetación media inundados casi permanentemente:

Bosques de pantanos de biomasa media y dosel abierto, con alta densidad de palmas y arbolitos, que ocurren en bacines mal drenados con inundación casi permanente



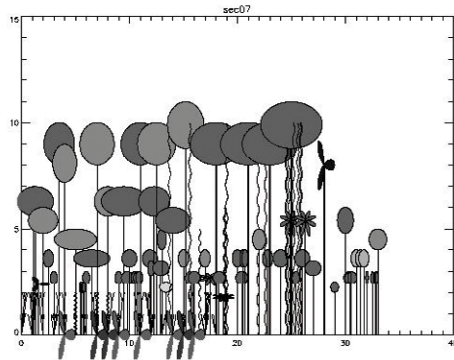
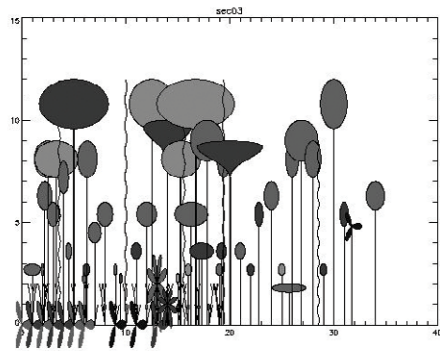
19. Pantanos de vegetación baja inundados permanentemente:

Áreas de pantanos con vegetación baja o muy baja, con alta densidad de arbolitos y densidad media de palmas.



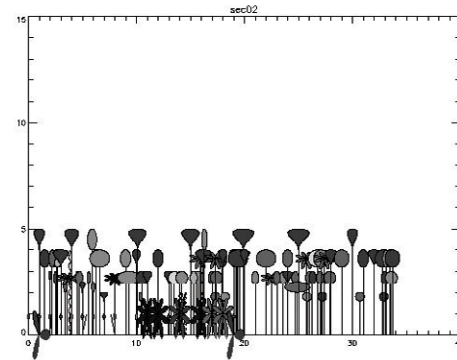
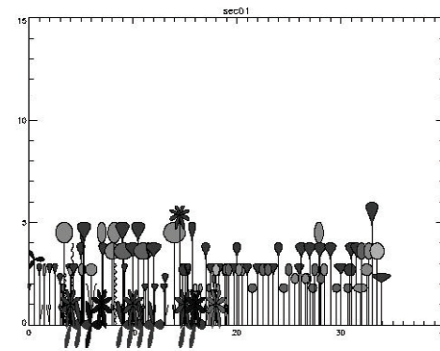
7. Arboladas amazónicas o bosque seco Chaco:

Áreas de bosque de dosel abierto, árboles, ocurre en áreas bien drenadas o inundadas ocasionalmente. Densidad media de árboles. Ocurre en suelos pobres, sobre roca o arenas blancas y en Bolivia es clasificada como la estructura del bosque seco del Chaco.



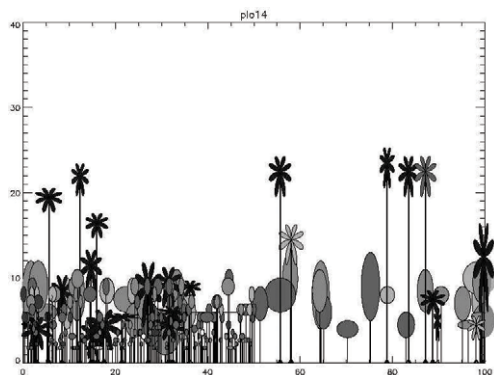
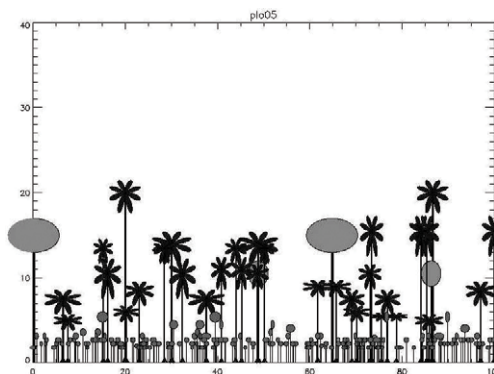
8. Arbustales altos:

Zona de arbustales o de crecimientos secundarios o rastrojos jóvenes, alta densidades arbustos, crece en zonas de suelos pobres como en el escudo guyanés en Guainía, en Chiribiquete o forma parte de la vegetación que se encuentra en las grandes sabanas



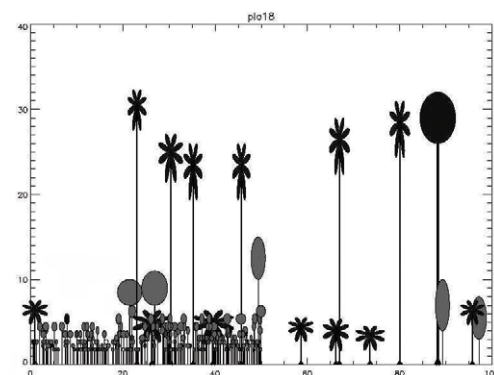
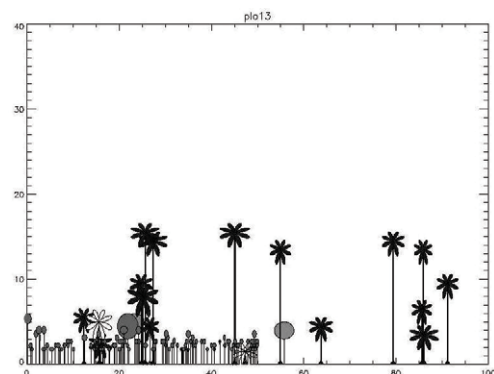
18. Pantanos de vegetación media inundados casi permanentemente:

Bosques de pantanos biomasa media y dosel abierto, con alta densidad de palmas y arbolitos, que ocurren en bacines mal drenados con inundación casi permanente



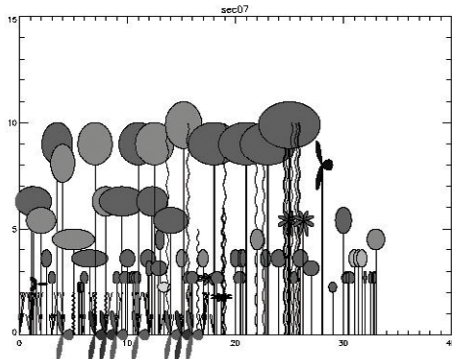
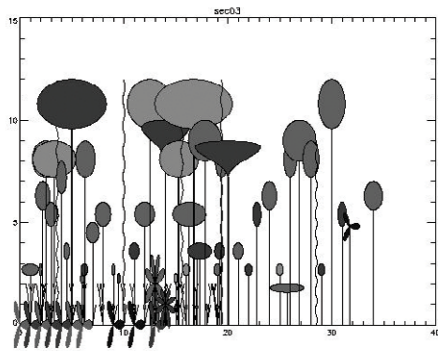
19. Pantanos de vegetación baja inundados permanentemente:

Áreas de pantanos con vegetación baja o muy baja, con alta densidad de arbolitos y densidad media de palmas.



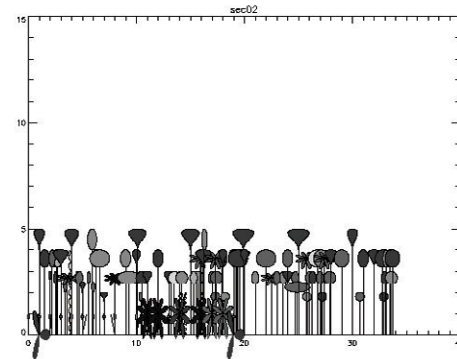
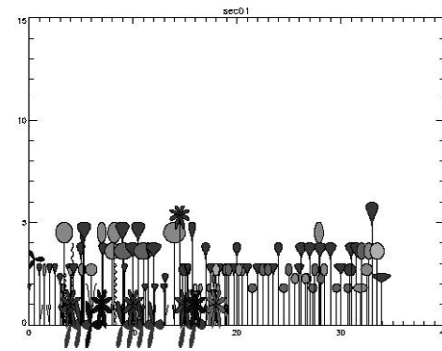
7. Arboladas amazónicas o bosque seco Chaco:

Áreas de bosque de dosel abierto arboladas, ocurre en áreas bien drenadas o inundadas ocasionalmente. Densidad media de árboles. Ocurre en suelos pobres, sobre roca o arenas blancas y el Bolivia es clasificada como la estructura del bosque seco del Chaco.



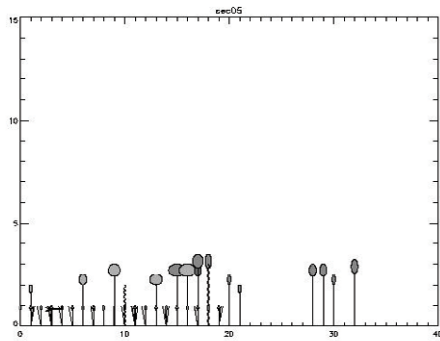
8. Arbustales altos:

Zona de arbustales o de crecimientos secundarios o rastrojos jóvenes, alta densidades arbustos, crece en zonas de suelos pobres como en el escudo guyanés en Guainía, el Chiribiquete o forma parte de la vegetación que se encuentra en las grandes sabanas



9-11. Pastos y sabanas:

Áreas cubiertas de gramíneas de diferente tipo, con una estacionalidad marcada, con biomasa baja en la época húmeda y muy baja en la época seca, con escasos u ocasionales arbustos y árboles.



10. Arbustales bajos, arbustales:

Zonas cubiertas de arbustos bajos, con biomasa baja-media, ocurre en áreas de suelos pobres o en zonas de crecimientos secundarios jóvenes o rastrojos reutilizados.

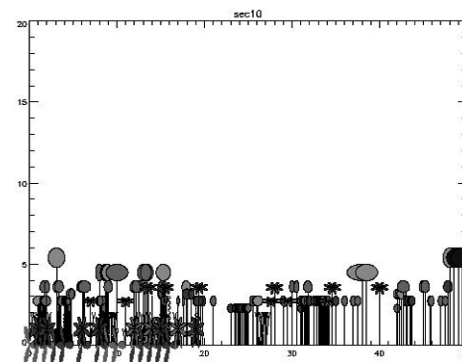
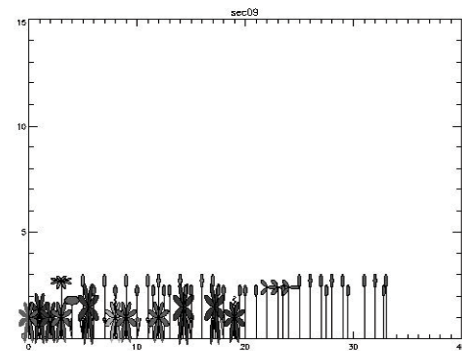
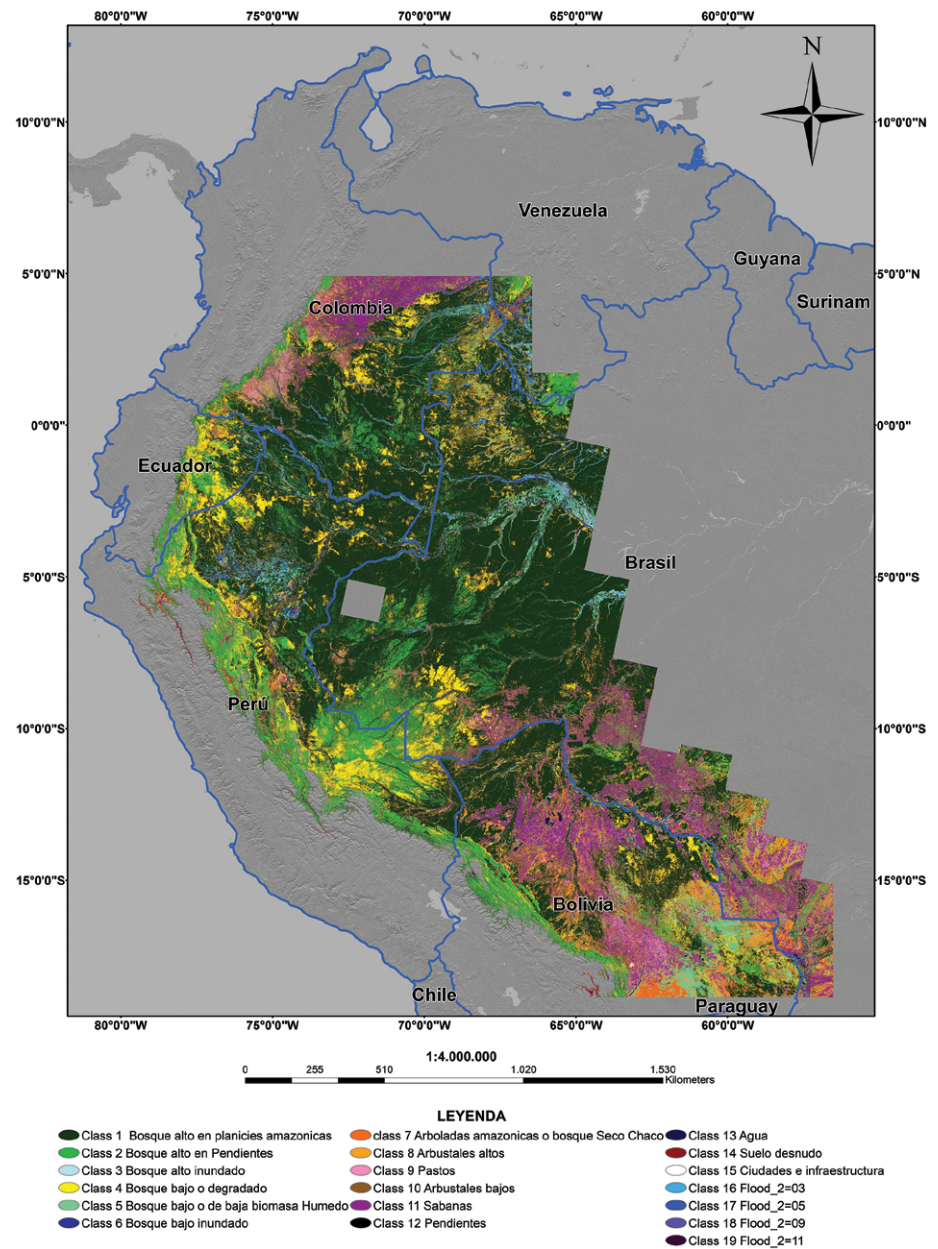


Figura 16: Mapa de unidades ecológicas resultado de la integración de la información del mapa estructural y el mapa de frecuencias de inundación.



La validación

La validación de cada punto se guardó en un archivo shape, en el que la tabla de atributos registra si el punto está o no clasificado, y si no lo está, se incluye la clase con que se confundió. Con esta información se generó la matriz de error y se procedió a calcular los estadísticos de expansión para ajustar los valores a las proporciones del área. Con estos valores se generaron las tablas 6 y 7. Se resalta la exactitud del productor, que es “la medida que indica la probabilidad de que el clasificador haya marcado un objeto de la imagen con el código A, dado que la verdad del terreno es el código A” (ICONTEC, 2010). La precisión general del mapa se calculó en 76 %, muy alto para la mayoría de las clases y medio para las arboladas amazónicas y el bosque bajo inundado. Igualmente, los valores de riesgos para el usuario son categorizados de bajo o muy bajo. También se presentan los estimativos de exactitud del usuario, que es la probabilidad de que la clase que se espera para la muestra esté clasificada como esa clase. Esta probabilidad es estimada con la fracción de los puntos que se espera estén bien clasificados con el número total de puntos bien clasificados en esa clase. La tabla 6 muestra los estimativos y los errores muestrales calculados y los rangos superior e inferior del estimativo para todas las clases. En general los valores de exactitud fueron altos o muy altos, pero en el caso del

bosque inundado y los pastos, los valores fueron bajos. Igualmente en general los riesgos del usuario para todas las clases, excepto para el bosque inundado.

Este resultado fue bastante inesperado, ya que una de las clases que los productores estábamos más seguros de que iban a estar bien clasificados eran los bosques inundados, debido a la capacidad del radar de detectar las inundaciones y a los patrones de inundación observados en los mapas clasificados. Sin embargo, tenemos dos explicaciones para estos resultados. Primero, al hacer la definición del número de muestras para la clase de inundación le asignamos un valor de error muestral muy alto. Para poder darles a otras clases menos representativas un valor de error un poco más bajo y así ajustar el muestreo de clases menos abundantes. Esto resultó en un número insuficiente de muestras para representar la clase apropiadamente y en una precisión baja en la validación. Esta precisión se da además por la dificultad de la detección de la inundación bajo dosel en las imágenes ópticas, incluso si ellas son de altísima resolución, como las usadas en este trabajo. Se propone hacer un uso del archivo de validación para repetir el proceso con un muestreo basado más en las proporciones representadas por cada clase y dar los errores de muestreo, basados en la dificultad que pueda tener el intérprete de diferenciar las clases.

Tabla 6: Exactitud del usuario estimada para todas las clases. El valor de exactitud y el valor del riesgo del productor se presentan con los correspondientes errores de muestreo y los rangos superior e inferior de la estimación.

		Exactitud del usuario						
		Estimación	Valor de exactitud	Superior	Inferior	Error de muestreo (%)	Riesgo del usuario	Valor de riesgo
C_1	Bosque alto en planicies amazónicas	0.77	Alta	0.79	0.75	0.940	22.94	Muy bajo
C_2	Bosque alto en pendientes	0.72	Alta	0.74	0.71	0.952	27.52	Bajo
C_3	Bosque alto inundado	0.65	Alta	0.68	0.63	1.063	34.55	Bajo
C_4	Bosque bajo o degradado	0.82	Muy alta	0.84	0.80	0.932	18.00	Muy bajo
C_5	Bosque bajo o de baja biomasa. Húmedo	0.68	Alta	0.70	0.66	0.997	32.27	Bajo
C_6	Bosque bajo inundado	0.56	Media	0.59	0.54	1.057	43.52	Bajo
C_7	Arboladas amazónicas o bosque seco Chaco	0.59	Media	0.61	0.57	1.006	41.43	Bajo
C_8	Arbustales altos	0.81	Muy alta	0.82	0.80	0.457	18.77	Bajo
C_9	Pastos	0.73	Alta	0.74	0.72	0.595	27.20	Bajo
C_10	Arbustales bajos	0.69	Alta	0.70	0.68	0.475	31.15	Bajo
C_11	Sabanas	0.74	Alta	0.75	0.73	0.660	25.86	Bajo
C_13	Agua	0.81	Muy alta	0.82	0.79	0.591	19.34	Muy bajo
C_14	Suelo desnudo	0.61	Alta	0.62	0.60	0.522	38.54	Bajo
C_15	Ciudades e infraestructura	0.95	Muy alta	0.97	0.92	1.293	5.48	Muy bajo
Porcentaje de acuerdo		76%						
Kappa		0.75						
Número total de puntos muestreados		54.179						

Tabla 7: Exactitud del usuario estimada para todas las clases. El valor de exactitud y el valor del riesgo del productor se presentan con los correspondientes errores de muestreo y los rangos superior e inferior de la estimación.

		Exactitud del productor						
		Estimación	Valor de exactitud	Superior	Inferior	Error de muestreo (%)	Riesgo del productor	Valor de riesgo
C_1	Bosque alto en planicies amazónicas	0.93	Muy alta	0.93	0.92	0.940	7.13	Muy bajo
C_2	Bosque alto en pendientes	0.60	Alta	0.63	0.57	0.952	40.08	Bajo
C_3	Bosque alto inundado	0.32	Baja	0.39	0.25	1.063	68.23	Alto
C_4	Bosque bajo o degradado	0.65	Alta	0.67	0.62	0.932	35.42	Bajo
C_5	Bosque bajo o de baja biomasa. Húmedo	0.63	Alta	0.68	0.58	0.997	37.09	Bajo
C_6	Bosque bajo inundado	0.78	Alta	0.85	0.72	1.057	21.53	Muy bajo
C_7	Arboladas amazónicas o bosque seco Chaco	0.82	Muy alta	0.87	0.77	1.006	18.20	Muy bajo
C_8	Arbustales altos	0.58	Media	0.61	0.55	0.457	41.98	Bajo
C_9	Pastos	0.42	Baja	0.45	0.38	0.595	58.49	Bajo
C_10	Arbustales bajos	0.91	Muy alta	0.93	0.88	0.475	9.32	Muy bajo
C_11	Sabanas	0.85	Muy alta	0.87	0.83	0.660	15.21	Muy bajo
C_13	Agua	0.72	Alta	0.78	0.66	0.591	27.74	Bajo
C_14	Suelo desnudo	0.86	Muy alta	0.94	0.78	0.522	13.72	Muy bajo
C_15	Ciudades e infraestructura	0.97	Muy alta	0.99	0.96	1.293	2.60	Muy bajo
Porcentaje de acuerdo		76%						
Kappa		0.75						
Número total de puntos muestreados		54.179						

El uso del mapa

Los mapas fueron generados en el marco del proyecto MacArthur y son propiedad intelectual de los autores y como tal, cualquier uso que se haga de ellos debe ser mencionado y citado debidamente. Los productos de esta línea base pueden ser distribuidos bajo licencia de uso y bajo los términos estipulados por SarVision, Amazon Conservation Team y Amazon Conservation a través de una solicitud escrita. No se entregará el área completa ni nivel de país, pero sí áreas correspondientes a municipios, parques naturales o departamentos. La resolución de estos productos es de 25m, por lo cual la escala de publicación de la información es de 1:75.000, se recomienda que los mapas se usen exclusivamente para estudios y análisis de escalas medianas o pequeñas (extensión regional o nacional).

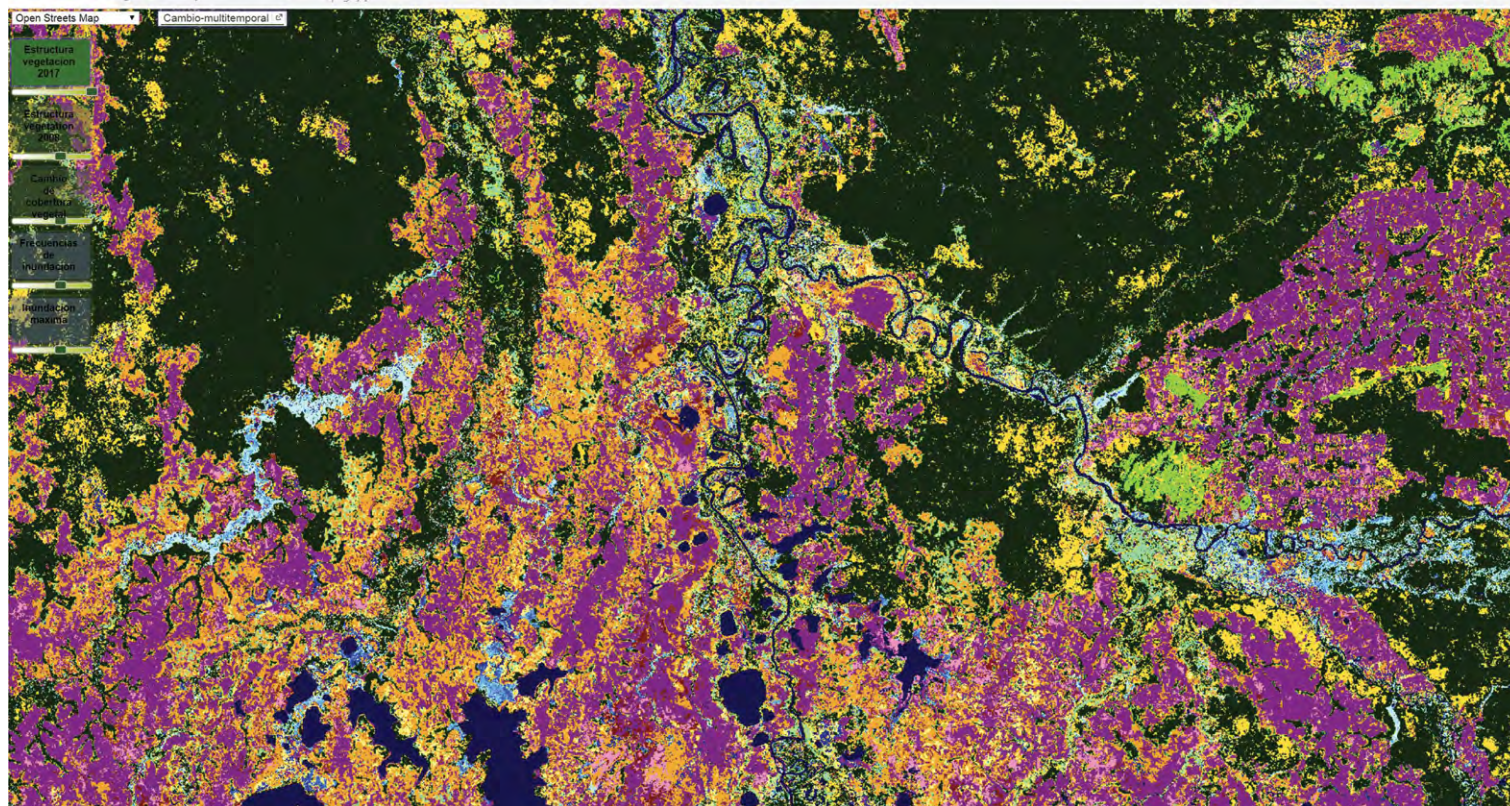
Debido a que los mapas son muy extensos y requieren de una gran capacidad de almacenamiento, para su inspección se adaptó un GEO-visor que permite el fácil acceso de los usuarios a la información. Este GEO-visor permite la observación y la integración de los productos

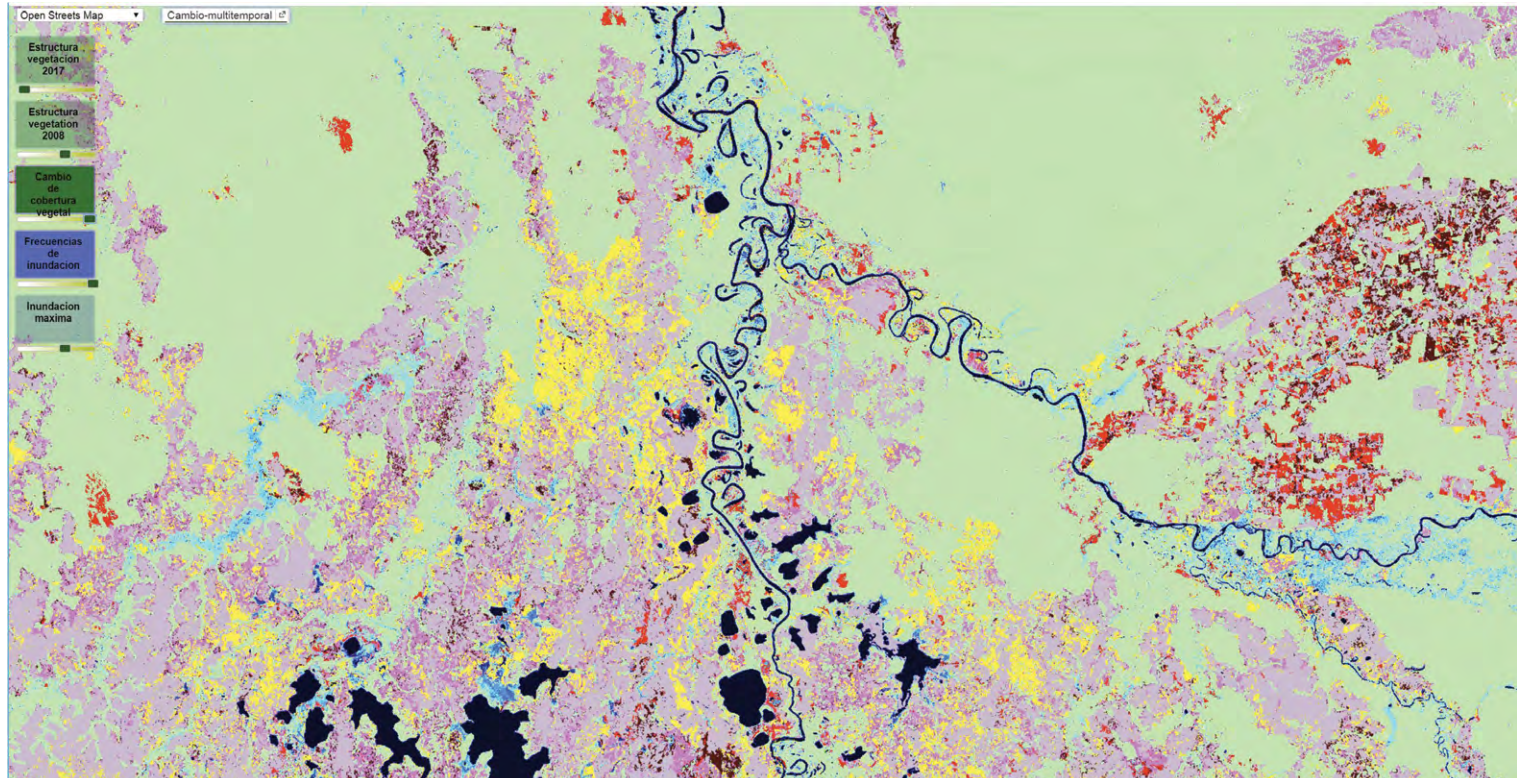
de esta línea base y la inspección de sus respectivas leyendas. La figura 17 muestra un pantallazo de los que muestra el visor: a la izquierda están los diferentes productos que se prenden y apagan al hacer clic y se despliegan sobre una referencia geográfica de mapas o satelital, con diferentes niveles de intensidad. Varios mapas se pueden activar simultáneamente, lo que permite integrar la información de las diferentes capas. A la derecha están las leyendas que se deben escoger de acuerdo con el producto utilizado.

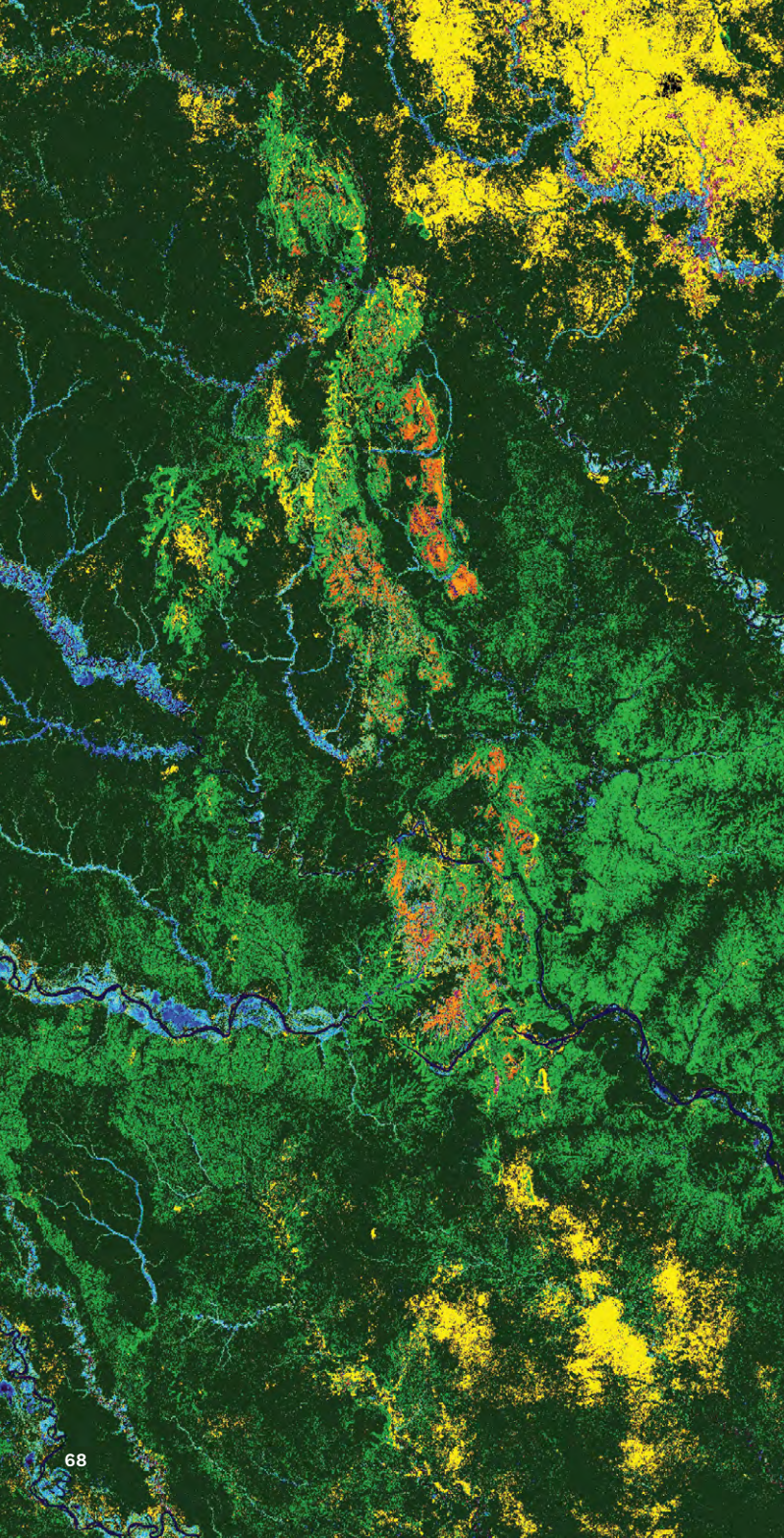
Este visor es muy básico, pero en un futuro se propone la integración de herramientas básicas de GIS que permitan a los usuarios calcular estadísticas utilizando archivos shapes o dibujando sus propios polígonos. De esta manera podrían generar datos y gráficos automáticamente que se puedan salvar y utilizar en reportes a nivel local.

Para tener acceso al GEO-visor escribir a M. Quiñones a quinones@sarvision.nl

Figura 17: Para la exploración del mapa se diseño un geo-visor simple: que permite visualizar los mapas y combinarlos en la pantalla. Se muestra el ejemplo para la región de los llanos de Moxos en Bolivia, donde se observan lagos entre paisajes de sabanas, bosque inundados y mega-plantaciones.







El futuro de los ejercicios de mapeo y el monitoreo a largo plazo: Apoyo a los Parques Nacionales Naturales y a las comunidades indígenas

Este producto es el segundo creado en el marco de las colaboraciones entre SarVision y Amazon Conservation Team. El primer mapa se publicó en 2017 (Quiñones et al 2017) y fue el Mapa base de estructuras de vegetación de la Amazonia colombiana. Para realizar este mapa se utilizaron como insumos únicamente las imágenes de radar Alos PALSAR disponibles en ese momento. Sin embargo, después de discutir el mapa con algunos expertos en vegetación en Colombia, fue evidente que a pesar de que el mapa muestra las estructuras de vegetación con gran precisión, había ciertos tipos de vegetación que estaban ausentes, otros no estaban completamente delineados y otras clases que no se clasificaban correctamente como las formaciones rocosas. Dentro de las clases que faltaba definir estaban las campinaranas o bosque en arenas blancas presentes en el noroccidente brasilero y en el Guainía en Colombia. También se notaba la falta de una definición más específica de los bosques bajos o degradados y de la demarcación más consistente de la varzeas.

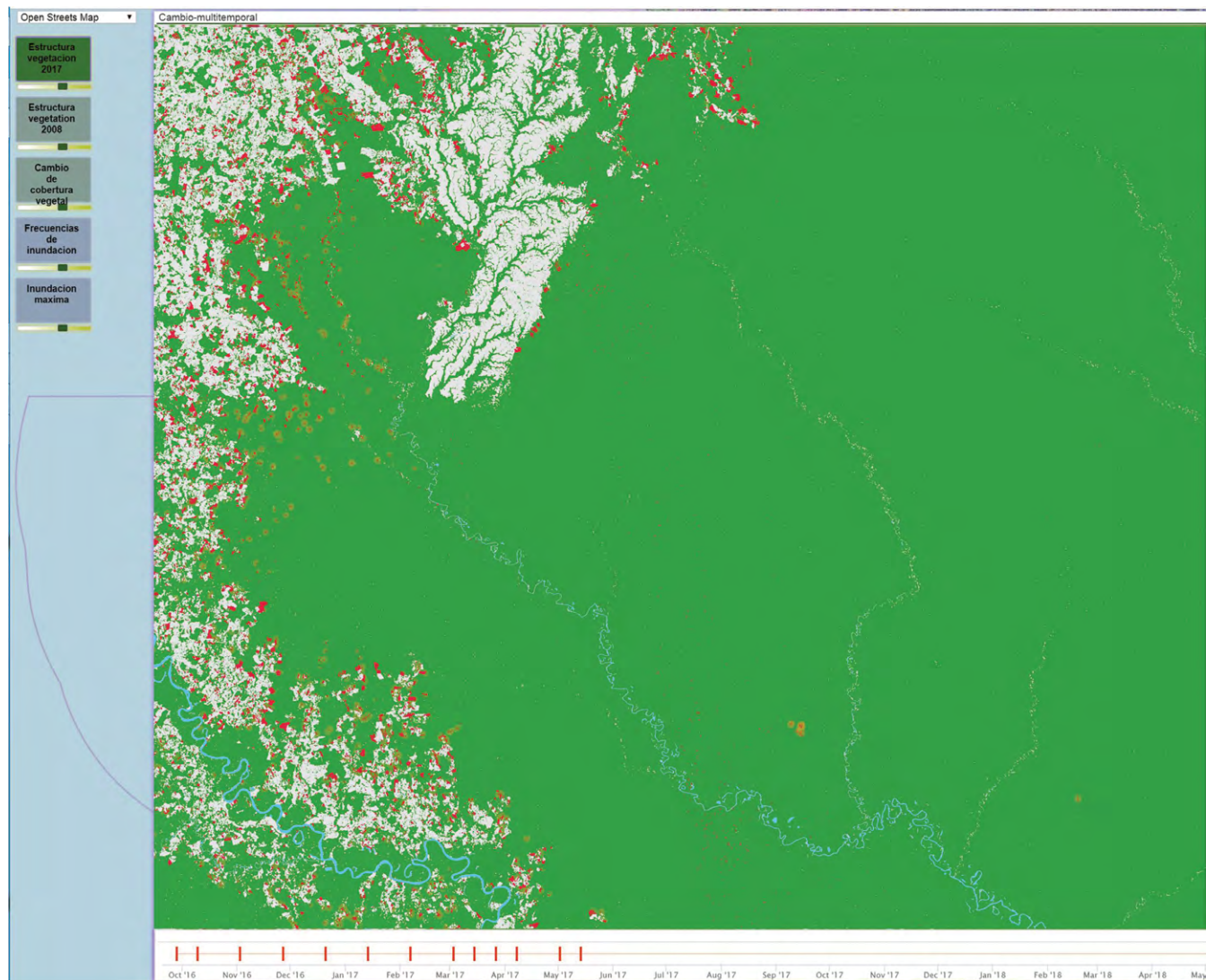
Adicionalmente nos dimos cuenta de la importancia de observar el BIOMA Amazónico en la región andina ya que es ahí donde se capta el agua y de donde se desprenden los grandes ríos que formarán el gran río Amazonas. El tema del mapeo de la distribución de las aguas amazónicas, su estacionalidad y ocurrencias llenó nuestras cabezas de interrogantes. Por esto al presentarse la oportunidad y el financiamiento decidimos hacer un nuevo mapa, pero esta vez para la cuenca occidental-andina de la Amazonia. Además, avanzando en la tecnología y buscando esas clases que nos quedaron faltando, decidimos hacer el mapa buscando la sinergia de las imágenes ópticas LanSAT y las imágenes de Radar Alos PALSAR.

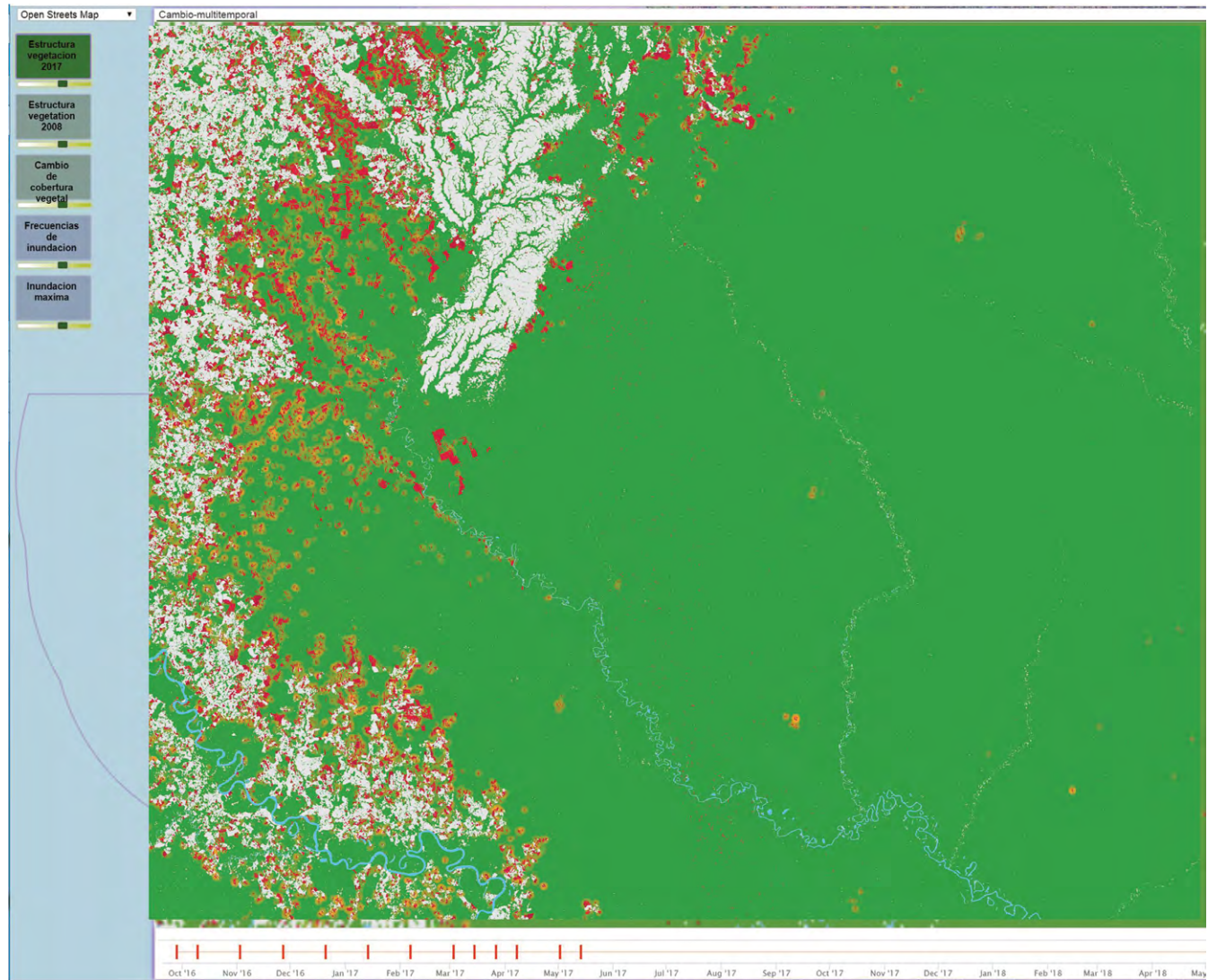
Creemos que logramos nuestros objetivos y que hemos adicionado información con respecto al mapa anterior. Además, nos ha llenado de más interrogantes y curiosidad con respecto al comportamiento del agua y de los ecosistemas especiales en toda la cuenca.

Además, la tecnología de radar ha avanzado muchísimo y hoy en día el Radar SENTINEL-1 de la Agencia Espacial Europea (ESA) está adquiriendo imágenes con regularidades. Estos avances técnicos y la disponibilidad de imágenes sin costo alguno nos permiten pensar en ejercicios de monitoreo consistente (sin nubes), generando información y sistemas de alerta temprana. La figura 18 muestra un ejemplo de monitoreo con imágenes SENTINEL-1 en un período de octubre de 2016 a octubre de 2018, montados en el visor de SarVision. El sistema de detección de cambios permite detectar cambios de cobertura de bosque, deforestación y degradación.

La generación de información actualizada cada 12 días, sobre el cambio de cobertura vegetal, deforestación, degradación y regeneración será el foco de nuestro futuro trabajo, para apoyar a las redes de parque nacionales en la amazonia occidental y a las comunidades indígenas que lo necesiten.

Figura 18: Ejemplo del sistema de detección de deforestación, basado en imágenes de radar SENTINEL-1. Estas imágenes muestran la deforestación ocurrida en la zona de San Vicente del Caguán en Colombia. La barra de la parte inferior muestra la fecha, en este caso hay detecciones para el período entre octubre de 2016 y octubre 2018. Cada línea es una fecha. Como se ve, hay un período en el que la serie de tiempo se interrumpe debido a la disponibilidad de las imágenes.





Referencias

- Adeney, J. & Christensen, Norman & Vicentini, Alberto & Cohn-Haft, Mario. (2016). White-sand Ecosystems in Amazonia. *Biotropica*. 48. 7-23. 10.1111/btp.12293.
- Cochran, W. G. (1977). *Sampling techniques* (3d ed). New York: Wiley. · CASTRO MEDINA W.F. Geomorfología: Zonificación ecológica y económica del departamento de Amazonas, estudio temático. Instituto de investigadores de la amazonia peruana. Gobierno regional de Amazonas. 2013
- Di Gregorio, A., & Jansen, L. J. M. (2000). *Land cover classification system: LCCS : classification concepts and user manual*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Duivenvoorden, J. F., & Lips, J. M. (1993). *Ecología del paisaje del Medio Caquetá: memoria explicativa de los mapas = Landscape ecology of the middle Caquetá basin*. Publicación Tropenbos (1. ed).
- Estupiñan-Suarez, L.M., C. Florez-Ayala, M. Quiñones, A.M. Pacheco and A.C. Santos. 2015. Detection and Characterization of Colombian Wetlands: Integrating geospatial data with remote sensing derived data. Using ALOS PALSAR and MODIS. Conference paper. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-7/W3. 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment, 11–15 May 2015, Berlin, Germany. <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-7-W3/375/2015/isprsarchives-XL-7-W3-375-2015.pdf>

- Hylke E. Beck, Niklaus E. Zimmermann, Tim R. McVicar, Noemi Vergopolan, Alexis Berg, Eric F. Wood, 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution Sci Data. 2018; 5: 180214. Published online 2018 Oct 30. doi: 10.1038/sdata.2018.214
- Jaramillo, C; Romero, I; D'Apolito. C; Bayona, G; Duarte. E; Louwye S; Escobar J; Luque J; Carrillo-Briceño J.D; Zapata. V; Mora A , Schouten, S; Zavada M; Harrington, G ; Ortiz, J; Wesselingh F.2017. Miocene flooding events of western Amazonia . Science Advances Vol 3, No. 5 03 May 2017
- Murcia García, U. G. (2014). Monitoreo de los bosques y otras coberturas de la Amazonia colombiana, a escala 1:100.000: datos del período 2012 (SINCHI (Organización: Colombia)).
- Murcia, U., Castellanos, H., Fonseca, D., Ceontescu, N., Rodríguez, J., & Huertas, C. (2009). Monitoreo de los bosques y otras coberturas de la Amazonia Colombiana. Bogotá D. C.: Instituto Sinchi.
- Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. Remote Sensing of Environment, 148, 42-57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- Olofsson, P., Foody, G. M., Stehman, S. V., & Woodcock, C. E. (2013). Making better use of accuracy data in land change studies: Estimating accuracy and area and quantifying uncertainty using stratified
- PRORADAM. 1979. La amazonia colombiana y sus recursos PROYECTO RADARGRAMETRICO DEL AMAZONAS, Publicación del Instituto Geográfico “Agustin Codazzi”, Ministerio de Defensa Nacional, Republica de Colombia y Centro Interamericano de Fotointerpretación con la colaboración del Gobierno de los Países Bajos.

- Quiñones M.J.; Vissers M.H.; Huertas C.; Palacios S.; Gil C.; Hettler B. 2017“Mapa Base de estructuras de vegetación de la Amazonia colombiana”. Publicación Amazon Conservation Team-SarVision.
- Quiñones M.J. 2002. Polarimetric Data for Tropical Forest Monitoring, Studies at the Colombian Amazon. TOPENBOS series 21,
- Ricaurte, Luisa & Patiño, Jorge & Zambrano, Diego & Arias-G, Juan & Acevedo, Oscar & Aponte, Cesar & Medina, Ruth & González, Mauricio & Rojas, Sergio & Flórez, Carlos & Estupiñán Suárez, Lina & Jaramillo, Úrsula & Santos, Ana & Lasso, Carlos & Duque, Andrés & Calle, Santiago & Velez, Jaime & Acosta, José & Duque, Santiago & Junk, Wolfgang. (2019). A Classification System for Colombian Wetlands: an Essential Step Forward in Open Environmental Policy-Making. Wetlands. 10.1007/s13157-019-01149-8.
- Rodriguez-Aachung F. (1990) Los suelos de áreas inundables de la amazonia peruana: potencial, limitaciones y estrategia para su investigación. Folia amazónica IIAP vol. nº 2 – 1990 7
- Zamora Carlos J J; 2009 Diagrama Bioclimático de Zonas de Vida del Sistema Holdridge adaptado e interpretado a la geografía del Perú. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/diagrama-bioclimatico-zonas-vida-sistema-holdridge-2009>.

