



Amazon: Multitemporal analysis of deforestation in the municipality of Breu Branco, Brazil

Andrés Velástegui and Aline de Lima

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

June 11, 2019

Amazonía: Análisis multitemporal de la deforestación en el municipio de Breu Branco, Brasil

Andrés Danilo Velástegui Montoya, Ph.D¹, Aline Maria Meiguins de Lima, Ph.D²

¹*Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Campus Gustavo Galindo Velasco Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador, dvelaste@espol.edu.ec*

²*Universidade Federal do Pará, UFPA, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Campus Universitário de Guamá Rua Augusto Corrêa 1, P.O. Box 66075-110, Belém, Brasil, ameiguins@ufpa.br*

Resumen— El presente artículo analiza el patrón espacial de alteraciones en la cobertura terrestre en el municipio de Breu Branco, uno de los siete municipios directamente afectados por el embalse de la central hidroeléctrica de Tucuruí, en la Amazonía brasileña. El análisis fue realizado usando imágenes del satélite Landsat 5 y 7. Se realizó el mapeo de las clases de cobertura de la tierra y la caracterización cuantitativa de las clases presentes en el municipio, en los períodos de pre-inauguración, finalización de la I fase, inicio de la II fase de construcción y conclusión de las obras de la central hidroeléctrica de Tucuruí. El estudio se procesó en dos fases, la primera corresponde a la aplicación del modelo lineal de mezcla en imágenes Landsat-TM segmentadas, ejecutados para el mapeo de las clases de cobertura de la tierra. La segunda fase se refiere al cálculo de las métricas del paisaje, con el propósito de caracterizar cuantitativamente las clases. Los resultados revelaron cambios en el patrón espacial de la cobertura forestal en el municipio de Breu Branco, a lo largo de los 26 años de análisis. Los escenarios de 1999 y 2010 fueron los que presentaron la mayor expansión de áreas deforestadas, concerniente a los escenarios de la II fase de construcción de la central hidroeléctrica de Tucuruí. El alto nivel de fragmentación está asociado a carreteras y caminos vecinales en la región, permitiendo conectividad entre puntos urbanos, facilitando el acceso a nuevas áreas y conversión de bosques en grandes áreas dedicadas al agronegocio.

Palabras clave— Cobertura de la Tierra, Central Hidroeléctrica, Tucuruí, Teledetección.

Abstract— This paper analyzes the spatial pattern of changes in land cover in the municipality of Breu Branco, one of the seven municipalities directly affected by the Tucuruí reservoir, in the Brazilian Amazon. The analysis was performed using images Landsat satellite. It was carried out the mapping of the land cover classes and the quantitative characterization of the classes present in the municipality, during the periods of pre-inauguration, completion of phase I, beginning of phase II of construction and completion of the works of the Tucuruí hydroelectric power plant. The study was carried out in two phases, the first one corresponds to the application of the linear mixing model in segmented Landsat-TM images, executed for the mapping of the land cover classes. The second phase refers to the calculation of the landscape metrics, in order to characterize the classes quantitatively. The results revealed changes in the spatial pattern of forest cover in the municipality of Breu Branco, during the 26 years of analysis. The scenarios of 1999 and 2010 were the ones that presented the greatest expansion of deforested areas, referring to the scenarios of the phase II of construction of the Tucuruí hydroelectric power plant. The high level of fragmentation is associated with local highways and roads in the region, allowing connectivity between urban spots, facilitating access to new areas and converting forests into large areas for agribusiness.

Keywords— Land cover, Hydroelectric plants, Tucuruí, Remote sensing.

I. INTRODUCCIÓN

La Amazonía brasileña se vuelve cada vez más atractiva como fuente de energía. Esto se debe a la necesidad del aumento del nivel de inserción de Brasil en el mercado económico internacional, con la exportación de productos primarios, como commodities minerales y agrícolas [1]. Por lo cual, en el territorio brasileño las centrales hidroeléctricas son propuestas bajo la insignia de la "seguridad energética", y por el gran potencial hidroeléctrico aún disponible en el país [2].

La crisis del petróleo entre 1972 y 1979, y el estímulo del gobierno japonés, llevaron a la construcción de la Central Hidroeléctrica (CH) de Tucuruí, al sureste del estado de Pará, con el objetivo de desarrollar la industria electro-intensiva del aluminio en la amazonía brasileña [3]. Los recursos hídricos en la región afectada por la CH de Tucuruí son estratégicos para el desarrollo socioeconómico, dada la extensión de las áreas potencialmente irrigables para agricultura, navegación, pesca y turismo, además de su rico potencial hidroeléctrico [4].

La energía hidroeléctrica es renovable, limpia, eficiente y permite el uso múltiple del agua [5]. Sin embargo, la instalación de este tipo de emprendimiento en la Amazonía implica cambios en la cobertura de la tierra, relacionados a cambios en la dinámica poblacional e infraestructuras complementarias. Esto repercute en la degradación y pérdida de bosques nativos, lo cual, fragmenta el paisaje en torno a estos megaproyectos, e interfiere el modo de vida de las poblaciones locales, mientras que, los beneficios de la energía ocurren en otras regiones [6].

De esta forma, se destaca la importancia del mapeo de la cobertura de la tierra, como mecanismo de identificación y espacialización del paisaje. En este estudio de caso, se propone la combinación de teledetección, sistema de información geográfica y métricas de paisaje, con el objetivo de determinar y evaluar los patrones de deforestación, altamente concentrados en el municipio de Breu Branco, durante un período de 26 años de operación y ampliación de la CH de Tucuruí, de 1984 a 2010. Es importante tener en cuenta que la CH de Tucuruí fue el primer proyecto hidroeléctrico de gran escala en la región amazónica [7] y por sus 32 años de operación, es un caso ideal para entender los impactos de los grandes embalses a lo largo del tiempo en la Amazonía. Esto permite verificar los cambios ambientales causados por la implantación del embalse, en relación a la fragmentación forestal en el municipio de Breu Branco.

II. METODOLOGÍA

A. Área de estudio

El área de estudio es delimitada por las latitudes 03° 24' 50" y 04° 06' 07" S y longitudes 48° 55' 24" y 49° 39' 40" W, corresponde a una parte de la región afectada por el embalse de Tucuruí (Fig. 1), formado por la represa del río Tocantins, en el estado de Pará.

La central hidroeléctrica de Tucuruí fue el primer proyecto hidroeléctrico a gran escala en la región amazónica [8], su embalse fue lleno e inaugurado en 1984, completando así la fase I de construcción y creando un lago artificial que inundó una superficie de 2.430 km² [6]. Los bosques tropicales de la región experimentaron un alto grado de fragmentación. Algunos árboles y poblados urbanos fueron

inundados por el embalse, mientras que la deforestación se produjo alrededor del lago artificial [9]. El poblado de Breu Velho fue una de las localidades afectadas, se situó en la ribera este del río Tocantins, siendo inmerso por el lago de Tucuruí, y desplazada al borde de la carretera PA-263 con el nombre de Breu Branco [10].

En la primera fase de construcción, la CH de Tucuruí tenía una potencia instalada de 4.000 MW (megavatios) de energía eléctrica [6]. En el año 1998, inició la ampliación de la central, fase que finalizó en 2007, alcanzando una potencia instalada de 8.370 MW de energía eléctrica. Para el año 2010 se inauguraron las esclusas de Tucuruí, lo que permitió retomar la navegabilidad por el río Tocantins y, por consiguiente, la finalización completa de las obras del proyecto hidroeléctrico de Tucuruí [11].

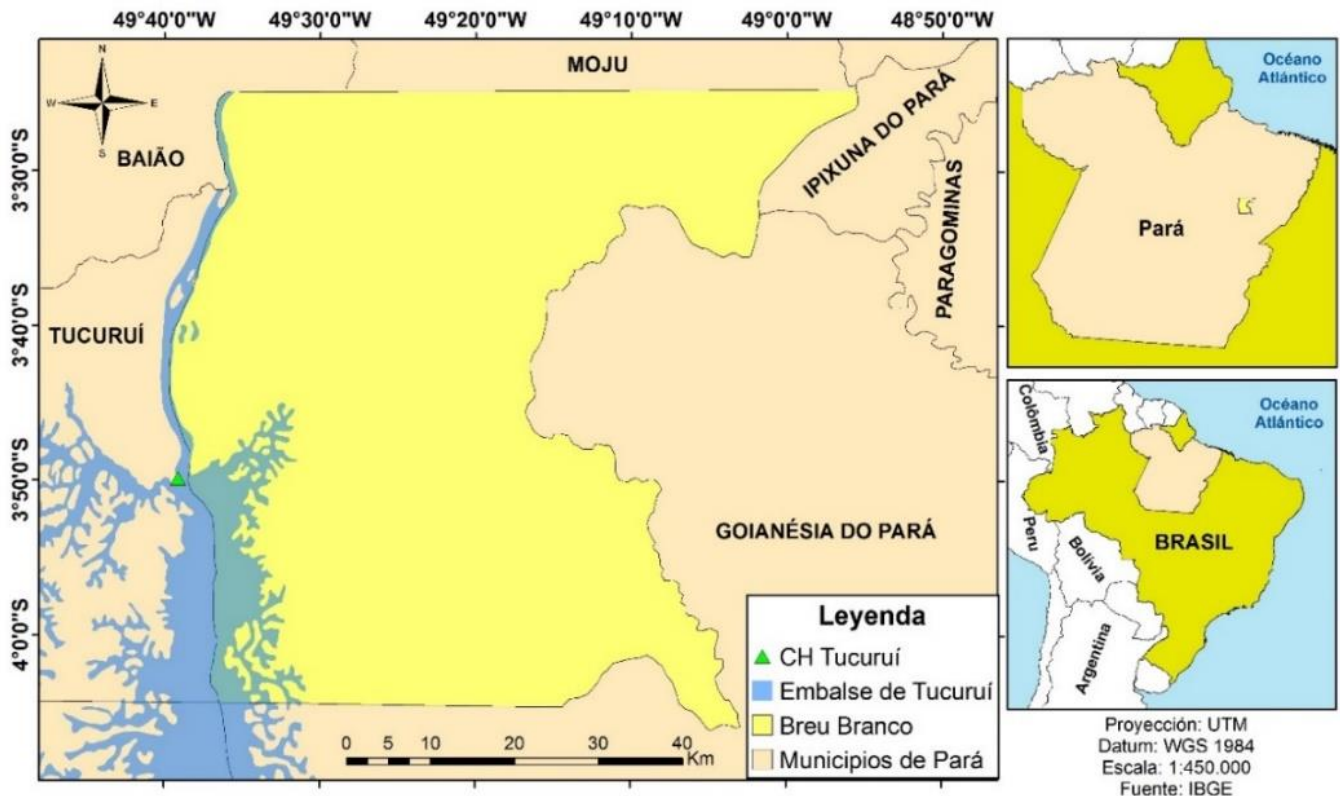


Fig. 1 Localización del área de estudio: municipio de Breu Branco

B. Procesamiento de datos de teledetección

Las imágenes del satélite Landsat fueron adquiridas del acervo de imágenes del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), con nivel de corrección Level 1 Terrain (L1T), ortorectificadas con proyección en UTM datum/esferoide WGS1984 [12]. Las imágenes corresponden a los meses entre mayo y octubre de los años 1984, 1988, 1999 y 2010. Específicamente, los datos de los años 1984, 1988 y 2010 fueron adquiridos por el sensor TM-Landsat 5, mientras que los datos de 1999 fueron recolectados por los sensores TM -Landsat 5 y ETM + -Landsat 7. A pesar de utilizar dos sensores en la adquisición de los datos, la extensión de las imágenes, la resolución espacial, la geometría y la calidad de los mismos, se mantuvieron consistentes, gracias a la coherencia del programa Landsat, sistema de satélite de observación de la Tierra más antiguo de

los Estados Unidos, habiendo adquirido datos desde 1972 [12].

Con el propósito de cubrir el municipio de Breu Branco, fueron adquiridas para cada año, cuatro escenas de imágenes adyacentes (órbita/punto: 223/62, 223/63, 224/62 y 224/63), totalizando 19 imágenes Landsat descargadas. El elevado porcentaje de cobertura de nubes en esta región, dificultó la adquisición de imágenes con menos del 5% de cobertura de nube en los años deseados. Por lo tanto, se necesitó el uso complementario de una segunda imagen de diferente fecha para una de las escenas (órbita/punto: 224/63) en los años de 1984, 1999 y 2010. Después de la adquisición de los datos, se creó una base de datos para almacenar la información procesada, utilizándose para ello, las aplicaciones TerraAmazon [13] y PostgreSQL [14].

Inicialmente se creó un proyecto en TerraAmazon, con el objetivo de determinar la proyección geográfica a ser utilizada (Latitud y Longitud) y sistema de referencia para delimitar el área de estudio, importando los límites municipales del área de estudio, en formato vectorial, a escala 1: 250.000 [15]. Adicionalmente, fueron elaboradas las composiciones coloridas RGB (Red - Rojo, Green - Verde, Blue - Azul) utilizando las bandas NIR (Near Infrared - Infrarrojo Cercano), SWIR-1 (Shortwave Infrared - Infrarrojo Medio) y R (Red - Rojo) respectivamente, y el realce de contraste lineal de las imágenes, para mejorar la separación entre las clases. Otra etapa importante del procesamiento fue el empleo del modelo lineal de mezcla espectral en las bandas NIR, SWIR-1 y R de las imágenes de los sensores TM-Landsat 5 y ETM+ -Landsat 7, para generar las fracciones sombra, suelo y vegetación. Los modelos lineales de mezcla fueron generados mediante la selección de píxeles referentes a los componentes sombra, suelo y vegetación [16].

A continuación, se aplicó el algoritmo de segmentación de imágenes por crecimiento de regiones. Este algoritmo agrupa píxeles utilizando como base dos umbrales: similitud y área. El umbral de similitud indica la distancia en que un píxel puede pertenecer a la agrupación y el umbral de área define el área mínima de cada grupo de píxeles [16], donde se utilizó los umbrales de área y similaridad de 16 y 8, respectivamente. Esta combinación ya fue aplicada con buenos resultados en parte del área de estudio [17].

Se realizó el proceso de clasificación polígono a polígono, donde se utilizaron las imágenes-fracción (sombra y suelo) segmentadas. La llave de interpretación de las clases fue basada en el PRODES Digital y en el comportamiento espectral de los objetos. Las clases seleccionadas fueron: 1) bosque, formaciones forestales que no presentan ninguna interferencia antrópica; 2) área antropizada, todo tipo de interferencia en las formaciones forestales, relacionadas directamente con las actividades humanas (agricultura, agropecuaria, áreas deforestadas, mosaicos de ocupación) y suelos expuestos relacionados a bancos de arena y llanuras aluviales; 3) área no inundada – corresponde al río Tocantins aguas abajo de la presa; 4) área inundada, considera el lago

artificial de Tucuruí; 5) agua, comprende a los demás cuerpos de agua (ríos, charcas y pozos); 6) área urbana, considera las manchas urbanas e; 7) nube, áreas cubiertas por nube y sombra de nube.

Para la clasificación polígono a polígono de los segmentos de las imágenes-fracción sombra y suelo, fueron seleccionados y clasificados según la respuesta espectral de los objetos en la composición colorida RGB de las bandas NIR, SWIR-1 y R, de los sensores TM-Landsat 5 y ETM+ -Landsat 7 [17]. Esta actividad fue realizada en escala 1: 30.000, para identificar los contornos de los segmentos que define cada clase. Después del proceso de clasificación, se realizó la edición matricial de las áreas mal clasificadas del área de estudio, mediante clasificación visual en escala 1: 30.000.

C. Análisis espacial del paisaje

Con la cobertura de la tierra, la estructura del paisaje fue cuantificada mediante el software FRAGSTATS [18], donde fueron determinadas las métricas de clases y paisaje. De esta manera, a nivel de todo el paisaje y clases mapeadas, se evaluaron las métricas de área de los fragmentos (AREA), área de los fragmentos de las clases (CA), número de fragmentos de las clases (NP), densidad de los fragmentos de las clases (PD) y tamaño medio de los fragmentos de las clases (MPS) [17].

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Después de la etapa de procesamiento de imágenes, se obtuvieron los mapas clasificados de la cobertura de la tierra para los años 1984, 1988, 1999 y 2010 (Fig. 2). Estos mapas, posibilitaron generar informaciones sobre los patrones espaciales de cobertura en el municipio de Breu Branco, a lo largo de un período de 26 años. A partir del análisis de los mapas de cobertura de la tierra, se observan algunas alteraciones en el paisaje del municipio, los valores de área en hectáreas (ha) y porcentaje ocupados por cada clase en los años 1984, 1988, 1999 y 2010 se encuentran en la Tabla I.

TABLA I
ÁREAS Y PARTICIPACIÓN RELATIVA DE LAS CLASES DE COBERTURA DE LA TIERRA EN EL MUNICIPIO DE BREU BRANCO

CLASES	Área [ha]				Participación relativa [%]			
	1984	1988	1999	2010	1984	1988	1999	2010
Bosque	333.742	284.409	150.070	78.639	84,90	72,35	38,17	20,00
Área urbana	121	166	368	637	0,03	0,04	0,09	0,16
Área antropizada	46.841	81.471	216.976	288.041	11,92	20,72	55,19	73,27
Área inundada	4.444	21.642	21.311	21.196	1,13	5,51	5,42	5,39
Área no inundada	2.841	2.758	2.916	2.974	0,72	0,70	0,74	0,76
Agua	1.303	1.230	1.478	1.632	0,33	0,31	0,38	0,42
Nube	3.828	1.443	0	0	0,97	0,37	0,00	0,00

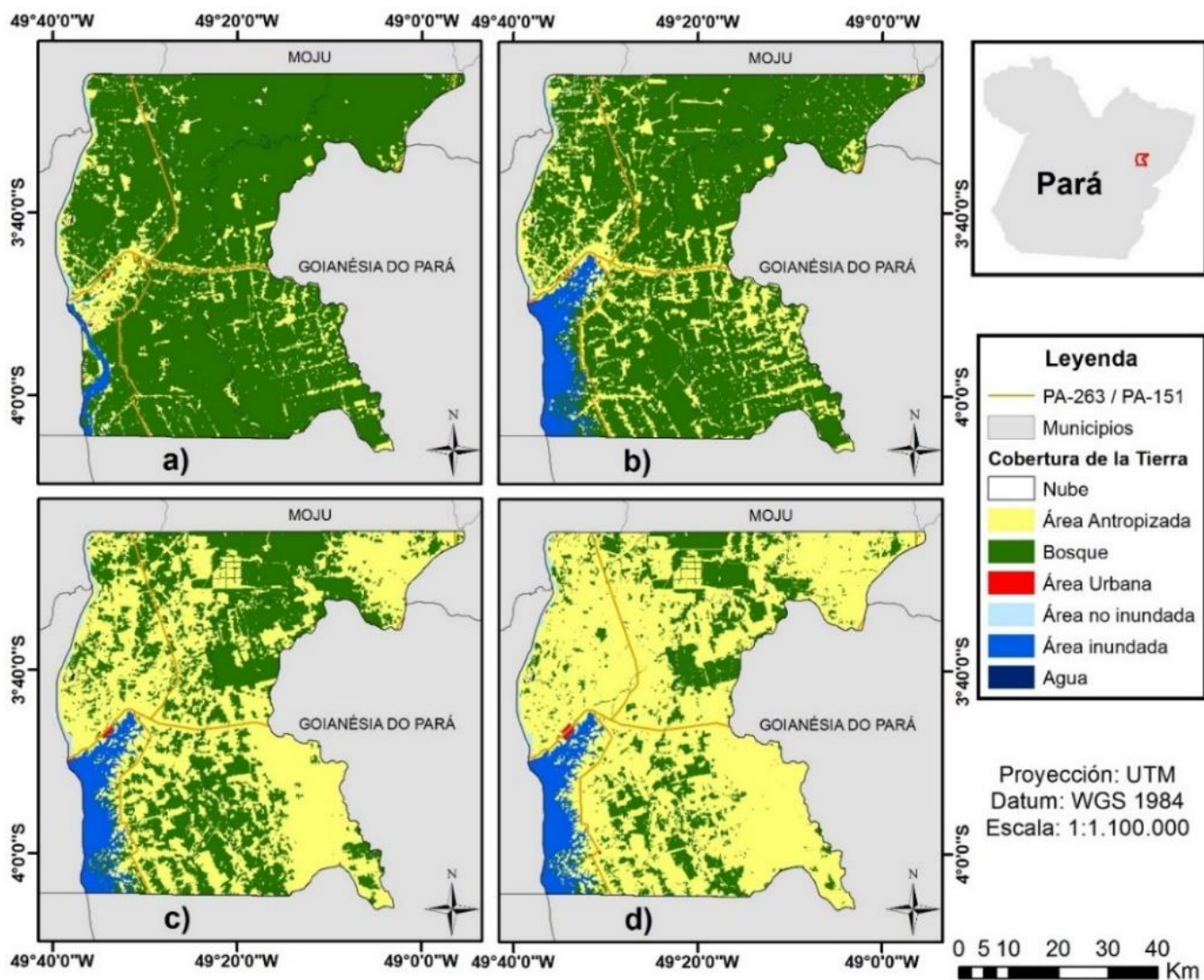


Fig. 2 Mapas temáticos de cobertura de la tierra del municipio de Breu Branco, referentes a los años 1984 (a), 1988 (b), 1999 (c) y 2010 (d).

Al analizar los resultados del mapeo, se puede verificar que las áreas antropizadas y urbanas a lo largo de los 26 años de análisis, fueron cerca de 6,1 veces mayores con relación al año 1984. De este modo, la clase antropizada pasó de 46.841 ha (11,92%) a 81.471 ha (20,72%) en el año 1988, a 216.976 ha (55,19%) en el año 1999, y a 288.041 ha (73,27%) en el año 2010. En relación a la clase área urbana, pasó de 121 ha (0,03%) a 166 ha (0,04%) en el año 1988, a 368 ha (0,09%) en el año 1999, y a 637 ha (0,16%) en el año 2010, desencadenando una caída del predominio de la cobertura forestal en el área de estudio (Tabla I).

En el año 1984, cerca del 85% del municipio de Breu Branco era cubierto por bosque (333.742 ha), mientras que, en los otros años analizados ese predominio bajó. Se constató, en el año 1988 alrededor del 70% del municipio (284.409 ha) todavía estaba cubierto por bosque, mientras que, en los años 1999 y 2010, la cobertura forestal se redujo al 38% (150.070 ha) y al 20% (78.639 ha) del paisaje del municipio, respectivamente.

Entre los años 1988 y 1999, el municipio de Breu Branco presentó la mayor propagación de áreas deforestadas, pasando de 81.637 ha (20,77%) a 217.344 ha (55,29%), mientras que la menor propagación de áreas deforestadas

ocurrió entre los años de 1999 y 2010, pasando de 217.344 ha a 288.677 ha (73,43%). El bajo incremento de áreas deforestadas durante el último período, puede estar asociado a que, en el año 1999, la mayor parte del territorio del municipio (55,19%) ya era cubierta por áreas antropizadas (ver Tabla I).

En el año 1984, las áreas antropizadas estaban concentradas al oeste del municipio y alrededor de las carreteras PA-263 y PA-151, zonas donde se acentuaron las tres únicas machas urbanas detectadas (Fig. 2a), el poblado de Breu Velho (71 ha), asentado a la ribera este del río Tocantins; la localidad de Breu Branco (44 ha), en el borde de la carretera PA-263 y; parte de la obra civil de la represa de Tucuruí (5 ha).

En el año 1988, estas áreas antropizadas estaban ubicadas alrededor de las carreteras PA-263 y PA-151 (Fig. 2b). Se detectaron dos manchas urbanas, referentes a la localidad de Breu Branco (109 ha) y parte de la obra civil de la represa de Tucuruí (57 ha). A causa del llenado el embalse, el poblado Breu Velho desapareció del mapa, debido a que quedó totalmente inundado por el lago artificial.

En lo que concierne a los años 1999 y 2010, las áreas antropizadas se presentan mucho más dispersas en todo el

territorio (Fig. 2c y 2d). Se identificaron nuevas manchas urbanas, donde la ciudad de Breu Branco corresponde a la mancha urbana de mayor tamaño, 284 ha en el año 1999 y 460 ha en 2010. En estos dos escenarios, el municipio de Breu Branco ya presentaba pocos segmentos de cobertura forestal, hecho que puede ser confirmado en la Tabla II, que exhibe el número de fragmentos forestales y su tasa de cobertura de la tierra en el municipio.

Tabla II

NÚMERO DE FRAGMENTOS Y TASA DE COBERTURA DE LA TIERRA DE LOS FRAGMENTOS DE BOSQUE PARA LOS AÑOS 1984, 1988, 1999 Y 2010

Tamaño de fragmentos [ha]	# Fragmentos				% Cobertura			
	1984	1988	1999	2010	1984	1988	1999	2010
<1	20	37	34	35	0,00	0,00	0,00	0,00
1 - 5	47	70	155	225	0,03	0,05	0,11	0,17
5 - 5.000	83	162	511	672	3,03	6,47	38,06	19,83
>5.000	2	2	0	0	81,84	65,83	0,00	0,00
Total	152	271	700	932	84,90	72,35	38,17	20,00

Según los datos de la Tabla II, el municipio de Breu Branco en el año 1984, el 81,84% del paisaje era cubierto por dos fragmentos forestales de gran tamaño (> 5.000 ha). Para el año 1988, se identificaron los mismos fragmentos forestales y representan el 65,83% del paisaje. En los escenarios 1999 y 2010, no se identificaron fragmento forestal de gran tamaño. Este resultado confirma la caída del predominio de la cobertura forestal en el área de estudio, produciendo fragmentaciones de los grandes segmentos de área forestal.

Los paisajes de menor valor de tamaño medio de fragmento forestal, son los de mayor fragmentación, debido que se relaciona el número de fragmentos y el área ocupada por todo el bosque [19]. Es posible tener un mejor entendimiento de diferentes aspectos de la estructura del paisaje, cuando el tamaño medio de fragmento es evaluado en conjunto con la densidad de fragmentos. Los resultados de la Tabla III revelan un proceso de fragmentación en el municipio de Breu Branco a lo largo de los 26 años de análisis, evidenciado por la reducción del tamaño medio (MPS) y aumento de la densidad (PD) de las manchas forestales a lo largo del tiempo.

Tabla III

NÚMERO (NP), DENSIDAD (PD) Y TAMAÑO MEDIO DE FRAGMENTOS FORESTALES (MPS) EN LOS AÑOS 1984, 1988, 1999 Y 2010

CENÁRIOS	NP [unid.]	PD [frag./100ha]	MPS [ha]
1984	152	0,04	2195,67
1988	271	0,07	1049,48
1999	700	0,18	214,39
2010	932	0,24	84,38

Al analizar las métricas de tamaño medio y densidad de las manchas en toda la región, la fragmentación es más evidente, debido al aumento del número de manchas en el paisaje (NP), que eran 152 en 1984 y pasaron a 271, 700 y 932 manchas en 1988, 1999 y 2010, respectivamente. La fragmentación, hizo que el tamaño medio de las manchas (MPS) disminuyera, pasando de 2195,67 ha en 1984 para 1049,48 ha, 214,39 ha y 84,38 ha en 1988, 1999 y 2010, respectivamente. En consecuencia, el aumento del número de

manchas también hizo que la densidad de las manchas (PD) sea mayor en 1999 y 2010.

La fragmentación forestal causa una diversidad de efectos, altera el tamaño y la dinámica de las poblaciones, los procesos ecosistémicos y las interacciones tróficas [20]. En este caso de estudio, la fragmentación creó un gran número de parcelas, lo que ocasiona que las especies que ocupan el interior de cada fragmento sufran una reducción en sus poblaciones, debido a que los efectos del tamaño de fragmento y la pérdida de hábitat actúan en conjunto.

IV. CONCLUSIONES

El mapeo de cobertura de la tierra reveló alteraciones en el patrón espacial de cobertura forestal en el municipio de Breu Branco, entre los períodos de pre-inauguración, finalización de la primera fase, inicio de la segunda fase de construcción y finalización completa del megaproyecto hidroeléctrico de Tucuruí. Al analizar este patrón espacial, se constató que presenta diferentes comportamientos para cada escenario, lo que permite identificar sus posibles causas.

Se constató que las tasas de deforestación en el municipio de Breu Branco fueron de 8.668,82 ha/año entre 1984 y 1988, 12.337,02 ha/año entre 1988 y 1999, y 6.481,84 ha/año entre 1999 y 2010. Por lo tanto, para el año 1999 el 55,29% del territorio ya estaba deforestado. Al analizar estos resultados con los niveles de fragmentación forestal del paisaje, se constata que, a partir del año 1999 el municipio de Breu Branco ya presentaba los mayores niveles de fragmentación, a causa de los pequeños tamaños medios de manchas forestales en los escenarios de 1999 y 2010. Se puede concluir, que el avance del nivel de fragmentación está asociada a la conectividad de la carretera entre la ciudad de Breu Branco con los municipios vecinos, facilitando el acceso y conversión de áreas de bosque en pasto, actividades realizadas a los alrededores de las manchas urbanas y carreteras.

REFERENCIAS

- [1] E. M. Moretto, C. S. Gomes, D. R. Roquetti, and C. O. Jordão, "Histórico, tendências e perspectivas no planejamento espacial de usinas hidrelétricas brasileiras: a antiga e atual fronteira Amazônica", *Ambiente & Sociedade*, vol. 15, no. 3, pp. 141-164, 2012.
- [2] C. Bermann, "O projeto da usina hidrelétrica Belo Monte: a autocracia energética como paradigma", *Novos Cadernos NAEA*, vol. 15, no. 1, pp. 5-23, 2012.
- [3] J. B. Silva, "A indústria do alumínio e a crise de energia", *Rem: Revista Escola de Minas*, vol. 54, no. 2, pp. 95-96, 2001.
- [4] Agência Nacional de Águas, "Plano estratégico de recursos hídricos da bacia hidrográfica dos rios Tocantins e Araguaia: Relatório síntese", Brasília: ANA, 2009.
- [5] C. J. C. Blanco, Y. Secretan, and A. L. A. Mesquita, "Decision support system for micro-hydro power plants in the Amazon region under a sustainable development perspective", *Energy for Sustainable Development*, vol. 12, no. 3, pp. 25-33, 2008.
- [6] P. M. Fearnside, "Social impacts of brazil's Tucuruí dam", *Environmental Management*, vol. 24, no. 4, pp. 483-495, 1999.
- [7] A. C. C. Souza, "Assessment and statistics of Brazilian hydroelectric power plants: dam areas versus installed and firm power", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 7, pp. 1843-1863, 2008.
- [8] W. V. Manyari, and O. A. Carvalho Jr, "Environmental considerations in energy planning for the Amazon region: downstream effects of dams", *Energy Policy*, vol. 35, no. 12, pp. 6526-6534, 2007.
- [9] P. M. Fearnside, "Greenhouse gas emissions from a hydroelectric reservoir (brazil's Tucuruí dam) and the Energy Policy Implications", *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 133, no. 1-4, pp. 69-96, 2002.

- [10] B. M. Netto, and É. Neiva, “Além da energia: preservação e desenvolvimento no entorno de Tucuruí”, Rio de Janeiro: Sistema Eletrobras, 2011.
- [11] O’Globo, “Na inauguração da eclusa de Tucuruí, Lula e Dilma protagonizam ato público de afagos mútuos”, 2010. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/na-inauguracao-da-eclusa-de-tucuruí-lula-dilma-protagonizam-ato-publico-de-afagos-mutuos-2917877>.
- [12] United States Geological Survey, “Landsat missions”. Disponível em: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat>.
- [13] TerraAmazon, “TerraAmazon version 4.6.2 for windows”, São Jose dos Campos, INPE/FUNCATE, 2016. Disponível em: <http://www.terraamazon.dpi.inpe.br/>.
- [14] PostgreSQL, “PostgreSQL version 9.4 for windows”, 2012. Disponível em: <https://www.postgresql.org>.
- [15] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, “Malhas digitais: 2015”, 2015. Disponível em: <https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais.html>.
- [16] Y. E. Shimabukuro, E. M. K. Mello, J. C. Moreira, and V. Duarte, “Segmentação e classificação da imagem sombra do modelo de mistura para mapear desflorestamento na Amazônia”, São Jose dos Campos: INPE, 1997.
- [17] A. D. M. Velástegui, A. M. M. Lima, and M. Adami, “Mapeamento e análise temporal da paisagem no entorno do reservatório de Tucuruí-PA”, *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 41, no. 2, pp. 553-567, 2018.
- [18] K. McGarigal, S. A. Cushman, and E. Ene, “Fragstats v4: spatial pattern analysis program for categorical and continuous maps”, Amherst: University of Massachusetts, 2012. Disponível em: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>.
- [19] K. McGarigal, and B. J. Marks, “Fragstats: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure”, Portland: Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 1995.
- [20] W. F. Laurance, and H. L. Vasconcelos, “Consequências ecológicas da fragmentação florestal na Amazônia”, *Oecologia Brasiliensis*, vol. 13, no. 3, pp. 434-451, 2009.