

# Climate variation in the Amazonian peneplain due to deforestation and urban expansion in Iquitos - Peru, between 1984 and 2023

Alexia Jimena Yuijan Rodriguez Prieto<sup>1</sup>, Jennifer Fransheska Quispe Roldan<sup>2</sup>, Khalil Ian Breytner Sanchez Rosales<sup>3</sup>, Ximena Casasola Lescano<sup>4</sup>, Yaritza Milen Sanjinez Viera<sup>5</sup>, Ulises Francisco Giraldo Malca, Doctor<sup>6</sup>  
Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, PERÚ,  
u201915645@upc.edu.pe<sup>1</sup>, u20201f379@upc.edu.pe<sup>2</sup>, u20201f495@upc.edu.pe<sup>3</sup>, u20211f014@upc.edu.pe<sup>4</sup>,  
u202120555@upc.edu.pe<sup>5</sup>, pcigugir@upc.edu.pe<sup>6</sup>  
Universidad Cesar Vallejo, Perú, ugiraldoma@ucvvirtual.edu.pe<sup>6</sup>

**Abstract**– *Tropical forests suffer the loss of millions of hectares every year due to land use and land cover change for agricultural production, resource exploitation and settlement development, contributing to global warming and altering the environmental conditions of the territory, as in the city of Iquitos in the Peruvian Amazon, where it is necessary to know how these impacts affect its population, activities and ecosystems. The objective of the study was to analyse the effects of urban expansion and global warming on the climate of the city of Iquitos, as well as its variation in relation to the climate of the towns of Pebas and Trompeteros, in the Peruvian Amazonian peneplain in the period 1984 - 2022, for which meteorological data from the study area was processed, maps of ecosystems and satellite images were processed to determine levels of vegetation vigour by calculating the normalised difference vegetation index in three quadrants over the towns of Iquitos, Pebas and Trompeteros, of similar latitude and altitude, but with different forest conservation status. The results showed that the city of Iquitos has tripled in size since 1984, with an average growth of 58.4 hectares per year, causing a heat island effect, with at least 1.1°C more than nearby rural areas, and a decrease of up to 1,000 millimetres of annual rainfall, with the effect being greater in its area because 33% of its territory has been altered, compared to Pebas and Trompeteros, which have more than 88% of their territories covered by primary forests. It is concluded that population growth drives deforestation for urbanisation, agricultural production and other purposes, which in countries with weak institutions is uncontrolled and unregulated. Likewise, deforestation increases the effect of global warming on the local climate due to the loss of environmental services provided by forests, such as temperature regulation and moisture supply, affecting the vigour of local vegetation.*

**Keywords**– LULC, NDVI, remote sensing, climate variability, climate change.

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).  
**DO NOT REMOVE**

# Variación climática en la penillanura amazónica por deforestación y expansión urbana de Iquitos – Perú, entre 1984 y 2023

Alexia Jimena Yuijan Rodriguez Prieto<sup>1</sup>, Jennifer Fransheska Quispe Roldan<sup>2</sup>, Khalil Ian Breytner Sanchez Rosales<sup>3</sup>, Ximena Casasola Lescano<sup>4</sup>, Yaritza Milen Sanjinez Viera<sup>5</sup>, Ulises Francisco Giraldo Malca, Doctor<sup>6</sup>  
Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, PERÚ,  
u201915645@upc.edu.pe<sup>1</sup>, u20201f379@upc.edu.pe<sup>2</sup>, u20201f495@upc.edu.pe<sup>3</sup>, u20211f014@upc.edu.pe<sup>4</sup>,  
u202120555@upc.edu.pe<sup>5</sup>, pcigugir@upc.edu.pe<sup>6</sup>  
Universidad Cesar Vallejo, Perú, ugiraldoma@ucvvirtual.edu.pe<sup>6</sup>

**Resumen**– Los bosques tropicales sufren la pérdida de millones de hectáreas cada año debido al cambio de usos de suelos para producción agropecuaria, explotación de recursos y desarrollo de asentamientos, contribuyendo al calentamiento global y alterando las condiciones ambientales del territorio, como en la ciudad de Iquitos en la Amazonía peruana, donde es necesario conocer cómo estos impactos afectan a su población, actividades y ecosistemas. En ese sentido, el objetivo del estudio fue analizar los efectos de la expansión urbana y el calentamiento global en el clima de la ciudad de Iquitos, así como su variación con relación al clima de las localidades de Pebas y Trompeteros, en la penillanura amazónica peruana en el periodo 1984 – 2022, para lo que se procesó data meteorológica del área de estudio, mapas de ecosistemas, e imágenes satelitales para determinar niveles de vigorosidad de la vegetación, mediante el cálculo del índice de diferencia normalizada de vegetación en tres cuadrantes sobre las localidades de Iquitos, Pebas y Trompeteros, de latitud y altitud similar, pero con diferentes estados de conservación de bosques. Como resultados se obtuvo que la ciudad de Iquitos triplicó su extensión desde 1984, teniendo un crecimiento medio de 58.4 hectáreas anuales, que provoca un efecto de isla de calor, con al menos 1.1°C más que áreas rurales cercanas, y el descenso de hasta 1,000 milímetros de precipitaciones anuales, siendo mayor el efecto en su ámbito por tener un 33% del territorio alterado, en relación con Pebas y Trompeteros, que tienen más del 88% de sus territorios cubiertos de bosques primarios. Se concluye que el crecimiento poblacional impulsa la deforestación para urbanización, producción agropecuaria y otros fines, que en países con débil institucionalidad se da sin control y de forma desordenada. Asimismo, la deforestación incrementa el efecto del calentamiento global sobre el clima local por la pérdida de servicios ambientales que brindan los bosques, como la regulación de temperaturas y el aporte de humedad, afectando la vigorosidad de la vegetación local.

**Palabras clave**– CUS, NDVI, sensores remotos, variabilidad climática, cambio climático.

## I. INTRODUCCIÓN

Desde 1990 se han deforestado cerca de 420 millones de hectáreas de bosque como consecuencia del cambio de uso del suelo (CUS), agravado por el cambio climático [1], dentro de los que destacan los bosques tropicales húmedos que tienen una gran biodiversidad y juegan un papel crucial en el equilibrio de la Tierra [2]. Por ejemplo, en el periodo 2010-2020, los

continentes africano y americano presentaron la mayor pérdida neta de superficie forestal con 3,94 y 2,60 millones de hectáreas al año, respectivamente [1]. Estos ecosistemas brindan servicios ambientales esenciales como la regulación del clima a través del ciclo hidrológico, la reducción del albedo, la facilitación de ciclos de nutrientes, la protección contra eventos extremos como sequías o incendios, la acumulación de carbono para controlar el efecto invernadero, el suministro de recursos naturales, la conservación de la biodiversidad y el valor cultural para comunidades aborígenes [3]. Por otro lado, se conoce que la presencia de bosques tiene tendencia a incrementar los niveles de precipitación, debido a que, los árboles absorben el agua en los suelos y la emiten a la atmósfera mediante la transpiración, por lo que el CUS, al remover la cobertura forestal afectará los patrones de precipitación en cierta medida [4].

Es importante mencionar que la deforestación tropical puede darse por diferentes causas, como la implementación de nuevas tierras de cultivo o pastizales en parcelas contiguas a las ya usufructuadas [5]. Asimismo, Newman et al. [6] identificaron a los caminos y ríos navegables como los principales contribuyentes de la degradación de los bosques, incrementando la posibilidad de deforestación a medida que un bosque se encuentre más cerca de una vía, porque facilita el acceso a nuevas tierras y la comercialización de su producción [6], como en el caso de la Amazonía brasilera donde casi el 95% del área deforestada ocurre dentro de los primeros 5.5 kilómetros desde las carreteras y 1 kilómetro desde los ríos [7], [8].

Los CUS en la mayoría de los casos son consecuencia de las interacciones entre las actividades humanas y el medio natural [9], siendo la deforestación el principal impacto en zonas boscosas como la Amazonía [10]. De esta manera, la expansión agrícola, el rápido crecimiento de la población y el desarrollo de asentamientos, vienen acelerando estos cambios [11], que en el caso de las ciudades tropicales muestran los niveles de expansión urbana más altos a nivel mundial, con altas tasas de deforestación y serias consecuencias para el equilibrio ecológico de los ecosistemas y la salud de la población [12]. En ese sentido, la destrucción de bosques tropicales implica la pérdida de servicios como el enfriamiento superficial por cambios en la sombra, alteración de la evapotranspiración y la

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).  
**DO NOT REMOVE**

reflectividad de la superficie, que provocan un calentamiento local fuertemente asociado con la extensión afectada [5], además de la pérdida de biodiversidad que puede ocasionar futuros problemas ambientales al interrumpir determinados procesos ecológicos [13]. Así, grandes parcelas deforestadas (10 - 100 km) muestran que las temperaturas máximas anuales son 10°C más cálidas que cuando estaban cubiertas de bosques, y cuyos efectos pueden extenderse hasta kilómetros más allá de los sitios deforestados, generando gradientes laterales de temperatura y presión [5]. Estos impactos pueden ser perjudiciales para la salud y el bienestar de las comunidades locales, ya que a menudo dependen de trabajos al aire libre y tienen una capacidad adaptativa comparativamente baja para ajustarse a cambios ambientales [5].

Además, según Nobre et al. [14] la deforestación a pequeña escala puede conducir a un aumento de la precipitación local por el llamado 'efecto-viento', mientras que la deforestación a gran escala puede disminuir las tasas de precipitación, variación que afecta negativamente a los bosques debido a un menor suministro de agua, siendo más propensos a la quema y reducción del rendimiento vegetal [15]. En ese sentido, la remoción de la cobertura vegetal en los bosques también genera impactos en las características físicas y químicas del suelo, como lo demuestra da Silva et al. [16], en un bosque tropical estacionalmente seco de Caatinga – Brasil, al encontrar en zonas deforestadas un *pH* levemente menor, un aumento de la porosidad total (afectando la densidad aparente), y un incremento en la presencia de ciertos nutrientes como P, Fe, Mn, Zn<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> o K<sup>+</sup> [16].

El crecimiento poblacional viene generando un desarrollo urbano rápido y desordenado, que implica cambios en el paisaje como la reducción y fragmentación de áreas verdes, erosión y el efecto de isla de calor urbano [17], debido a la implementación de infraestructuras como redes viales, que facilitan la explotación o conversión de bosques [13].

Asimismo, la urbanización transforma superficies naturalmente permeables en superficies impermeables, al reemplazar los suelos por edificios, superficies asfaltadas, pavimentadas, o de otros materiales sintéticos [18], además de provocar cambios en los sistemas fluviales como escurrimientos más rápidos y menores tiempos de concentración [19], observando un aumento promedio de la dinámica de almacenamiento de agua terrestre y de escorrentía aproximadamente 10 veces mayor que en regiones no deforestadas [20].

La selva amazónica representa alrededor del 40% de los bosques tropicales que quedan en la Tierra, siendo fundamental para la regulación del clima continental y global por su gran capacidad de secuestro de carbono, estimado en 76 mil millones de toneladas de carbono almacenados en 390 mil millones de árboles [21]. En ese sentido, un amplio número de estudios muestran el aporte que tiene la deforestación de la Amazonía en el calentamiento global [22], impulsado por el rápido desarrollo económico que experimenta América del Sur, que se manifiesta en la expansión del área agrícola, la extracción de materias

primas y el crecimiento urbano, estimándose que su capacidad de sumidero de carbono desaparecerá en 2035 [21].

Existe una demanda de información precisa y confiable para monitorear los procesos de deforestación, relacionada con la detección de cambios en la cubierta forestal de forma automatizada, que reduzca significativamente el esfuerzo que demanda el monitoreo convencional de bosques [23]. Para ese fin, se aplican técnicas de teledetección, usando imágenes satelitales multiespectrales de diferentes fechas para analizar la reducción de la cubierta arbórea a una escala mayor [23], o en la construcción de escenarios de deforestación, como lo hizo Palacios Vega et al. [24] frente al crecimiento de la ciudad de Iquitos para el año 2029 mediante el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*NDVI*), usando imágenes Landsat del periodo 1999 – 2018 [24].

En ese marco, a diferencia de otros lugares menos impactados, la ciudad de Iquitos al ser la urbe más grande en la Amazonía Peruana [25], viene presentando una rápida expansión al igual que sus áreas productivas periurbanas [26], provocando impactos en las condiciones climáticas del ámbito por la remoción o alteración de bosques y ecosistemas naturales, sustituidos por cubiertas de asfalto, concreto y otros materiales sintéticos, que estarían afectando a las comunidades locales, así como a la flora y fauna de los alrededores, que es necesario conocer y entender para generar información útil a los tomadores de decisiones para mejorar la gestión del territorio. En ese sentido, el objetivo de la investigación es analizar los efectos de la expansión urbana y el calentamiento global en el clima de la ciudad de Iquitos, así como su variación con relación a los climas de las localidades de Pebas y Trompeteros, en la penillanura amazónica ecuatorial de Perú en el periodo 1984 - 2022.

## II. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la ciudad de Iquitos y alrededores, situado en la provincia de Maynas, departamento de Loreto, definida por el cuadrante de coordenada de longitud 73°4'12.8" - 73°26'56.3" O y latitud 3°35'42.6" - 3°55'49.6" S, en la penillanura de la cuenca del río Amazonas, con un rango altitudinal que va desde los 79 m s.n.m. (río Amazonas) hasta los 154 m s.n.m. (poblado El Milagro), cubriendo una extensión de 155,400 hectáreas.

El clima, definido a partir de los datos de las estaciones meteorológicas (EM) Punchana (91 m s.n.m), Amazonas (113 m s.n.m), Puerto Almendra (96 m s.n.m), Moralillo (106 m s.n.m) y San Roque (106 m s.n.m), se clasifica entre Húmedo (B3), Moderadamente húmedo (B2) y ligeramente húmedo (B1), con nula o pequeña deficiencia de agua (r), mega térmico o cálido (A'), y con baja concentración (25% - 26%) de la eficiencia térmica en verano (a').

La ciudad de Iquitos, que al 2022 presentó una población de 485,581 habitantes [27] y una densidad poblacional de 444 habitante por kilómetro cuadrado<sup>-1</sup> [28], se extiende en una superficie de 3,758 hectáreas [29], con un crecimiento medio de 36 hectáreas al año<sup>-1</sup> entre 1905 y 2010, provocando la pérdida

de la cobertura vegetal natural [24]. Asimismo, es una ciudad que desde 1970, ha superado las tasas de crecimiento poblacional del país a causa de una elevada fecundidad y fuerte movimiento migratorio [24], como consecuencia del despoblamiento de las áreas rurales de la región [30].

En el departamento de Loreto, ante la deficiencia de cobertura de vías terrestres de comunicación, el transporte fluvial representa el 90% de la movilidad de mercadería y población, con una mayor dinámica a comparación del transporte terrestre por la baja densidad de carreteras existentes [31], siendo los alrededores de estos cursos de agua las zonas con mayor intervención antrópica. Asimismo, la expansión de plantaciones agroindustriales de cacao, café o palma aceitera son las principales causas de la deforestación en Loreto en las últimas dos décadas, como las 1,949.4 hectáreas destruidas del Fundo Tamshiyacu por la empresa Cacao del Perú Norte S.A.C., que según la Dirección General de Asuntos Ambientales Agrarios, deforestó con la finalidad de ejercer prácticas agrícolas, provocando la erosión de suelos [32] y la pérdida los servicios ecosistémicos que brindaban sus bosques.

72° 3'28'' O y latitud 3°9'10'' - 3°29'10'' S), y de Trompeteros, situada en la provincia de Loreto (longitud 74° 51' 29'' - 75°14'9''O y latitud 3°37'28'' - 3°57'34'' S), a una distancia similar a la línea ecuatorial y en ambos casos ubicados en la penillanura amazónica (con elevaciones similares).

La localidad de Pebas, ubicada sobre la margen izquierda del río Amazonas, alberga alrededor de 11,079 personas [33], cuyo territorio está destinado principalmente a la producción de arroz, maíz amarillo, plátano y yuca, que, junto con la pesca, caza, recolección de productos del bosque (chonta y aguaje) y extracción forestal, concentra al 66% de la población económicamente activa (PEA) del distrito [34]. Asimismo, presenta una superficie agrícola de 23,902 hectáreas [35], que, junto a otros proyectos de desarrollo abandonados, constituyen las áreas deforestadas en la zona [36]. Además, tiene un flujo diario de pasajeros y mercaderías en las embarcaciones que cubren la ruta Iquitos - Santa Rosa de Yavarí (triple frontera) alcanzando su volumen anual de carga de 28,722 toneladas métricas en tránsito [37].

En el caso de la localidad de Villa Trompeteros, posee una población conformada por 8,396 personas [33], y se caracteriza por ser una locación vinculada a la explotación de hidrocarburos, al ubicarse dentro del Lote 8 y ser base de sus operaciones en la zona [38]. En este distrito, la población dedicada a actividades de uso directo del territorio como agricultura, ganadería, silvicultura y pesca asciende al 51% de la PEA [34], que aprovecha una superficie agrícola de 7,665 hectáreas [35], siendo el cuadrante de estudio mejor conservado.

Es importante señalar que los principales ecosistemas existentes en los tres cuadrantes (**Fig. 1**) son: pantanos de palmeras (147,270 hectáreas), bosques de colinas bajas (105,889 hectáreas), bosques aluviales inundables (97,598 hectáreas), bosques de terrazas no inundables (12,903 hectáreas), y los ríos amazónicos (38,329 hectáreas), entre otros [39], comprendidos en la penillanura amazónica, considerada una de las formaciones más ricas de vida de la tierra, con una alta biodiversidad de plantas de hasta 300 especies de árboles por hectárea<sup>1</sup>, gracias a los climas cálidos y húmedos que la caracterizan.

### III. MÉTODOS

La investigación es cuantitativa de tipo exploratorio y correlacional, desarrollada por medio de instrumentos estadísticos e informáticos. Para obtener los datos necesarios, se buscó información en diversas bases de datos como *Scopus* y *Web of Science*, acerca de la expansión urbana, la deforestación, sus efectos en la variabilidad climática, entre otras, permitiendo el acceso a una amplia gama de recursos, como artículos científicos relevantes, libros virtuales, reportes técnicos y tesis. De la misma manera, se usaron estudios de instituciones competentes y experiencia en el monitoreo de los procesos de deforestación en la Amazonia, y de las condiciones meteorológicas en el Perú, tales como el Servicio Nacional

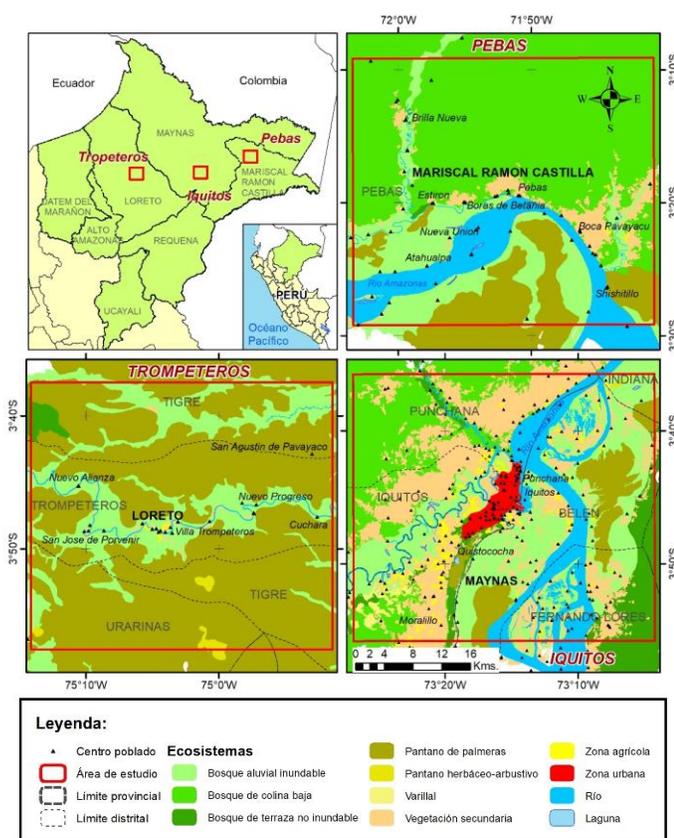


Fig. 1. Mapa de ecosistemas del área de estudio en los alrededores de la ciudad de Iquitos y los cuadrantes de referencia en las localidades de Pebas y Trompeteros.

Para analizar el impacto que tiene la ciudad de Iquitos en el clima local, se consideró 2 cuadrantes de referencia de la misma extensión en las localidades de Pebas, ubicada en la provincia de Mariscal Ramón Castilla (longitud 71°40'46''-

Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR), el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), Ministerio de Ambiente (MINAM), entre otros.

#### A. Variación espacial de temperaturas y precipitaciones en la localidad de Iquitos

La data de las EM ubicadas en los alrededores de la ciudad de Iquitos, disponible para el periodo enero de 2017 a diciembre de 2023, fue descargada de la plataforma web del SENAMHI, procesada y analizada en hojas de cálculo y tablas dinámicas del software *Microsoft Excel*, con el fin de determinar las temperaturas medias, precipitaciones anuales, variación de las condiciones climatológicas en la ciudad de Iquitos y alrededores, así como sus cambios estacionales. Para ese fin, mediante el software de código abierto *QGIS*, se hizo la interpolación de la información de temperaturas y precipitaciones (de forma anual y estacional) de las EM para determinar la variación espacial de cada parámetro, en el ámbito de la ciudad de Iquitos y sus alrededores.

Asimismo, se consiguió registros de la temperatura del aire (a 2 metros del nivel de superficie) en el periodo 1984 – 2020, a partir del *dataset ERA5* disponible en la plataforma web *Google Earth Engine*, con la finalidad de conocer la evolución de las temperaturas medias en cada uno de los cuadrantes de estudio, registrados por un mismo sensor, para el mismo periodo y en condiciones similares para las 3 locaciones.

#### B. Análisis espacial y temporal de las variaciones climáticas en función de coberturas vegetales y su vigorosidad (NDVI).

Mediante la descarga y procesamiento de imágenes satelitales *Landsat 4-5 TM* (1984-2002; 2004-2011), *7 ETM+* (2003, 2012) y *8-9 OLI\_TIRS* (2013-2023), con nula o poca presencia de nubes sobre los cuadrantes de interés, empleando el software *QGIS* para determinar tanto los cambios en las coberturas vegetales, ocasionadas por la expansión urbana o la aplicación de la frontera agrícola. La compilación de bandas espectrales para generar escenas a color se hizo con la extensión “*Semi-automatic classification Plugin*”, para continuar con el cálculo del *NDVI* [24] de cada escena, usando la herramienta “*Raster calculator*” para la aplicación de la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{\text{Infrarrojo cercano} - \text{Banda roja}}{\text{Infrarrojo cercano} + \text{Banda roja}}$$

- Infrarrojo cercano (NIR): banda en la que la clorofila tiene valores elevados de reflectancia
- Banda roja (RED): Banda en la que la clorofila tiene una baja reflectancia

Con la imagen *NDVI* resultante para cada año se determinó la mayor o menor presencia de vegetación vigorosa de alta actividad fotosintética (asociada con vegetación densa), de acuerdo con la concentración de píxeles de alto valor (positivos

próximos a 1). En contraste de las superficies con escasa o sin presencia de actividad fotosintética representadas por píxeles de bajo valor (próximos a cero o negativos). Aplicando este criterio se hizo una clasificación de las escenas *NDVI* para estimar el área urbana de la ciudad de Iquitos y superficies periurbanas sin cobertura vegetal.

Se empleó el Mapa de Ecosistemas del Perú, disponible en la plataforma web de intercambio de datos *GEOSERVIDOR* del, que, tras su descarga en formato digital, fue procesado en el software *QGIS* mediante su intersección con los tres cuadrantes de análisis, para determinar los ecosistemas presentes en cada uno de ellos, así como las extensiones de cada ecosistema por cuadrante.

Asimismo, se obtuvo reportes del calentamiento global emitidos por las agencias espaciales de *NASA Goddard Institute for Space Studies* [40], *Japanese Meteorological Agency* [41], y *Met Office Hadley Centre/Climatic Research Unit* [42], para correlacionarlas con las temperaturas de cada uno de los cuadrantes y determinar el nivel de impacto que tiene el cambio climático global en cada uno de ellos.

## IV. RESULTADOS

#### A. Variación espacial de temperaturas y precipitaciones en la localidad de Iquitos

Al hacer la interpolación de temperaturas medias anuales de las EM ubicadas en la ciudad de Iquitos y alrededores, se observa la ocurrencia del llamado efecto isla de calor urbano (**Fig. 2**) al presentar las temperaturas más elevadas, las EM ubicadas al interior de la ciudad (Amazonas y San Roque), con al menos 1.1 °C por encima a las EM con menores registros (Tamshiyacu y Punchana), que están ubicadas en ámbitos rurales y cercanas al río Amazonas. La máxima diferencia se tiene entre la EM de Amazonas (al interior del casco urbano) donde la temperatura media alcanza 27.6 °C, y la EM Tamshiyacu (ubicada a aproximadamente 28 kilómetros al sur de la ciudad) que registra una temperatura media de 26.2°C, siendo la estación más alejada del casco urbano y de la carretera asfaltada Iquitos - Nauta.

En el caso de las precipitaciones, también se presenta una variación espacial en su distribución, teniendo los valores más elevados las EM de Francisco Orellana (3527 mm) y Maniti (3366 mm), ubicadas al noreste de Iquitos, seguidas por las EM ubicadas en zonas rurales periurbanas, como Punchana (2,796), Tamshiyacu (2,766 mm), Puerto Almendra (2,763 mm) y Moralillo (2,736 mm), y teniendo los valores más bajos las EM Amazonas (2,595 mm) y San Roque (2,500 mm), ubicadas al interior de la ciudad de Iquitos (**Fig. 3**). Curiosamente, se encontró que la EM Mazan registra precipitaciones de 2,389 mm, similares a las EM de la ciudad de Iquitos, pese a que se ubica a una latitud similar a las EM de Francisco Orellana o Maniti, y en una zona rural. Sin embargo, se destaca que en periodos anteriores esta EM registró precipitaciones más abundantes alcanzando una media anual de 2,870 mm entre 1992 y 1997, incrementándose hasta 3,064 mm en el quinquenio siguiente, para posteriormente tener un progresivo

descenso hasta una media de 2,260 mm al año entre 2019 y 2023.

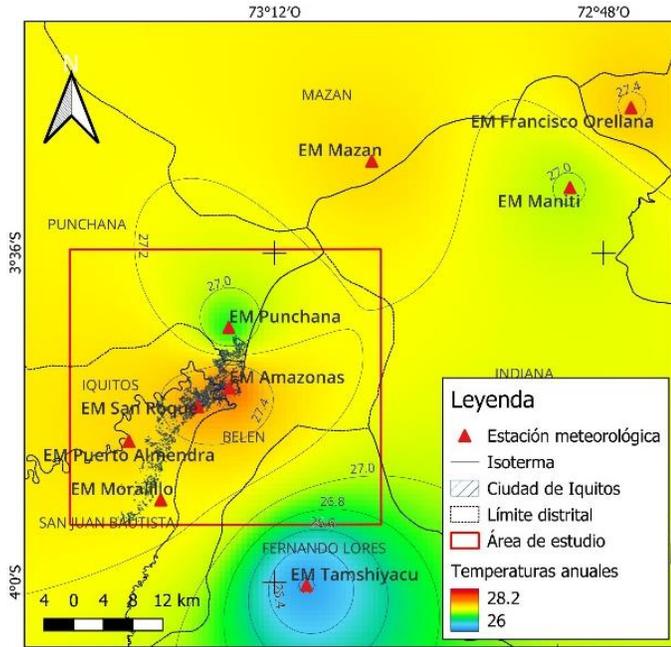


Fig. 2. Mapa de temperaturas medias de la ciudad de Iquitos y alrededores.

Tras el procesamiento de las imágenes satelitales, se aprecia que ciudad de Iquitos tuvo una expansión progresiva desde 1984 (1,350 hectáreas) al 2022 (con 4,111 hectáreas), con un crecimiento promedio de 58.4 hectáreas al año<sup>-1</sup>, mostrando que en las últimas cuatro décadas incremento su extensión hasta en 253% el área que presentaba en 1984 (Fig. 4).

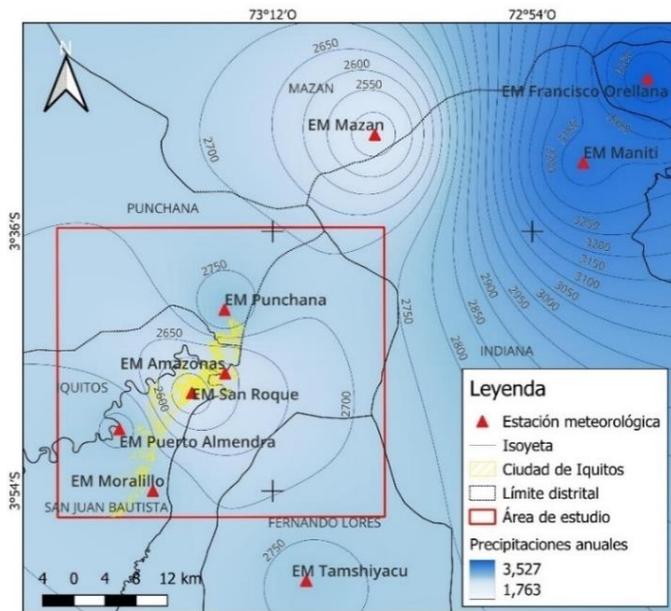


Figura 3. Mapa de distribución de precipitaciones anuales en la ciudad de Iquitos y alrededores.

Interpretando visualmente las imágenes satelitales, a medida que avanzan los años, se percibe una expansión poblacional hacia la zona suroeste de la ciudad, sobre el eje que constituye la carretera asfaltada que une Iquitos con el puerto de Nauta, cuya franja de deforestación persiste en su ampliación en la misma dirección.

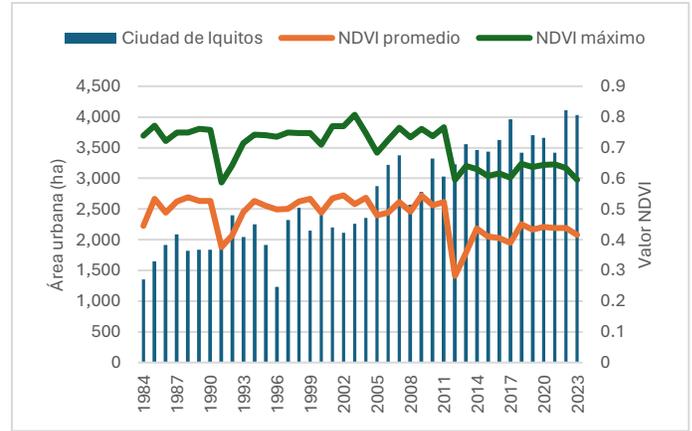


Fig. 4. Evolución del área urbana de Iquitos y de los valores NDVI en su ámbito.

### B. Variaciones climáticas y de la vigorosidad de coberturas vegetales

A lo largo de todo el periodo de análisis tanto la localidad de Iquitos, como las dos localidades de referencia (Pebas y Trompeteros) muestran una evolución parecida, pero con una clara diferencia entre sus temperaturas medias (Fig. 5). Así, Iquitos presentó las temperaturas medias más elevadas (24.97 - 26.14°C), seguido de Pebas (24.8 - 25.92°C) y por último Trompeteros con las temperaturas medias más bajas (24.44 - 25.89°C); sin embargo, desde 2016 las temperaturas medias de Pebas hasta el final del periodo de análisis. Asimismo, se aprecia una variación en las tendencias de temperaturas en las tres locaciones, porque en las dos primeras décadas (hasta el año 1999) mostraban una tendencia negativa siendo más marcada en Trompeteros con  $-0.25^{\circ}\text{C}$ , seguido de Iquitos con una variación de  $-0.06^{\circ}\text{C}$  y finalmente Pebas con  $-0.01^{\circ}\text{C}$ , cambiando la tendencia en los últimos 21 años con el aumento de las temperaturas en los tres poblados, registrando la mayor variación en Trompeteros con  $0.92^{\circ}\text{C}$ , seguido de Iquitos con  $0.6^{\circ}\text{C}$  y finalmente Pebas con  $0.39^{\circ}\text{C}$ .

Asimismo, se destaca que Iquitos y Trompeteros experimentaron, coincidentemente, condiciones climáticas más parecidas al tener los registros más fríos para ambos en el año 1999 y las más cálidas en el año 2016, mientras que Pebas presentó su temporada más fría en 1986 y la más cálida en el 2010. Sin embargo, al correlacionar sus registros, se obtiene una mayor regresión para las temperaturas medias de Iquitos y Pebas ( $R^2 = 0.9569$ ), seguido de cerca por la relación Iquitos y Trompeteros ( $R^2 = 0.9388$ ), y con un resultado más bajo la relación entre Trompeteros y Pebas ( $R^2 = 0.8449$ ).

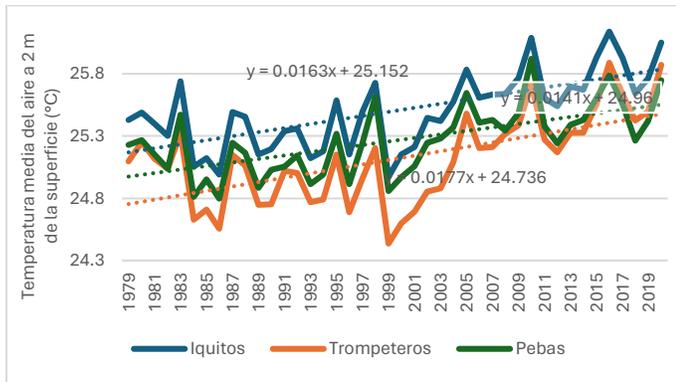


Fig. 5: Cambios de la temperatura del aire (a 2 metros del nivel de superficie) en el periodo 1979 – 2020 del dataset ERA5.

Al procesar las imágenes multiespectrales aplicando la técnica del NDVI para cada una de las localidades, se obtuvo que el sector de Trompeteros presentó un valor NDVI promedio ( $NDVI_{med} = 0.53529$ ), seguido por la localidad de Pebas ( $NDVI_{med} = 0.4881$ ), y finalmente el cuadrante que cubre a la ciudad de Iquitos ( $NDVI_{med} = 0.475852031$ ).

Con los valores anuales de temperatura media de cada cuadrante, se aplicó correlaciones con los datos de variación media anual de temperaturas globales reportadas por la NASA Goddard Institute for Space Studies, la Japanese Meteorological Agency, y la Met Office Hadley Centre/Climatic Research Unit, obteniendo relaciones positivas en todos los casos, con valores de regresión moderadamente fuertes ( $0.52 < R^2 < 0.65$ ), pero con un valor ligeramente más elevado para Iquitos, seguido por los resultados de Pebas y con los valores más bajos en Trompeteros (Tabla I).

TABLA I  
CORRELACIÓN ENTRE TEMPERATURA MEDIA ANUAL DE CADA LOCALIDAD Y EL INCREMENTO DE TEMPERATURAS GLOBALES

Cuadrante	NASA -Goddard Institute for Space Studies	Japanese Meteorological Agency	Met Office Hadley Centre/Climatic Research Unit
Iquitos	0.6456	0.6298	0.6416
Pebas	0.5936	0.6016	0.6010
Trompeteros	0.5669	0.5233	0.5520

Nota: Temperatura media anual de aire a 2 metros sobre la superficie del dataset ERA5- y estimaciones del calentamiento global por las principales agencias meteorológicas mundiales.

En relación con el mapa nacional de ecosistemas [43], se destaca en la zona de Iquitos, dentro de las áreas sin CUS: a los bosques aluviales inundables con 36,633 hectáreas (24%) y los bosques de colina baja con 23,905 hectáreas (15%), mientras que dentro de las zonas alteradas tenemos a la vegetación secundaria con 43,373 hectáreas (28%) y la zona urbana con 3,549 hectáreas (2%). En ese sentido, en total se registran 84,447 hectáreas correspondientes a ecosistemas naturales, sin mayor intervención antrópica, en tanto que las áreas con CUS al 2018 ascendían a 50,672 hectáreas (Fig. 6).

En el caso de Pebas, dentro de las áreas no alteradas por la actividad humana predomina el ecosistema de: bosque de colina baja con una extensión de 81,984 hectáreas (53%), seguido por el bosque aluvial inundable (18%) y el pantano de palmeras (12%), con 27,876 y 18,873 hectáreas respectivamente. Mientras que las áreas alteradas por las actividades antrópicas (vegetación secundaria y áreas agrícolas) se extienden en 9,151 hectáreas (6%), cifra significativamente menor a las 128,787 hectáreas (83%) correspondientes a zonas sin CUS (Fig. 6).

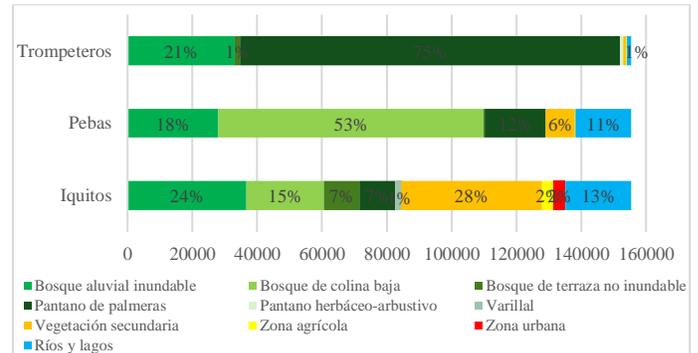


Fig. 6: Extensión de ecosistemas presentes en los cuadrantes de Iquitos, Pebas y Trompeteros.

Nota: Datos calculados a partir del mapa de ecosistemas de Perú [43]

Finalmente, en Trompeteros los ecosistemas no alterados más representativos son el pantano de palmeras con 117,282 hectáreas (76% del cuadrante) y el bosque aluvial inundable con 33,056 hectáreas (21%). Con relación a las áreas cuya vegetación ha sido alterada por el ser humano, tan solo suman 1,068 hectáreas (vegetación secundaria y áreas agrícolas), menos del 1% de su extensión total (Fig. 6).

## V. DISCUSIÓN

En el caso de las variaciones de temperaturas medias en el cuadrante de Iquitos, se puede notar que todas se encuentran en un rango de 26°C a 28°C, visualizando que las más altas se presentan en el área urbana, en tanto que las temperaturas tienden a disminuir hacia los lugares que se encuentran más alejados de la ciudad. Al analizar para cada año con la data meteorológica disponible en la EM de Iquitos y alrededores, en el periodo 2017 - 2023, se determinó que el efecto de isla de calor urbano se mantuvo en cada uno de los periodos anuales, así como estacionales, pero con diferentes niveles de intensidad teniendo una fluctuación entre el valor más bajo de 1.1°C (2017) y el más alto de 1.9 °C (2022). Poveda & Mesa [44] explican este fenómeno como una consecuencia de la deforestación, debido a que gran parte de la energía que recibe el territorio se gasta en calentar la superficie [44], en lugar de su aprovechamiento en la fotosíntesis y la evapotranspiración que realizaban los bosques en el pasado.

Considerando la proximidad que tienen las EM analizadas con la ciudad de Iquitos, además de compartir condiciones fisiográficas (penillanuras) y latitudinales similares (ubicación

ecuatorial), deberían presentar climas más parecidos entre sí. Sin embargo, al analizar el mapa de precipitaciones anuales del ámbito se determina que la variación en los volúmenes de lluvia se debería a un factor latitudinal y de conservación de bosques, porque las EM ubicadas más al noreste (Francisco Orellana y Maniti), cuyas áreas con CUS son más pequeñas y sus bosques están mejor conservados, presentan mayores precipitaciones a comparación de las EM ubicadas más hacia el oeste (Mazán) y al sur (Punchana, Amazonas, San Roque, Puerto Almendra, Tamshiyacu, o Moralillo) donde las áreas urbanas y zonas con CUS son más extensas, especialmente en ambas márgenes de la carretera que une Iquitos con el puerto de Nauta, presentando una variación de al menos 570 mm anuales, pero que pueden superar hasta los 1,000 mm de diferencia. Además, es posible que la ciudad de Iquitos y áreas deforestadas en sus alrededores tenga un efecto en la reducción de las precipitaciones, evidenciado por los registros de la EM Mazán, que según Mu & Jones [45], se debería a que el desbosque genera efectos en las precipitaciones, incrementándolas en los primeros años, y haciendo que descendan en años posteriores sobre las áreas deforestadas antiguas[45].

Analizando el efecto que tiene la expansión del área urbana de la ciudad de Iquitos, se encontró una alta correlación con el paso de los años ( $R^2 = 0.862$ ), que indicaría que su crecimiento ha sido más o menos constante a lo largo de los 40 años de estudio. Asimismo, el área urbana tiene una alta correlación directa con la temperatura media a 2 metros de la superficie ( $R^2 = 0.66$ ), que mostraría que el crecimiento urbano de la ciudad influye en el aumento de sus temperaturas (Fig. 7), por la mayor presencia de áreas pavimentadas, con edificaciones de concreto y otros materiales que poseen propiedades físicas de elevada capacidad térmica [46]. Estas infraestructuras al recibir gran insolación durante todo el año, gracias a no tener sombra (por la deforestación) y estar cerca de la línea ecuatorial, irradian el calor producido y elevan significativamente las temperaturas en sus alrededores.

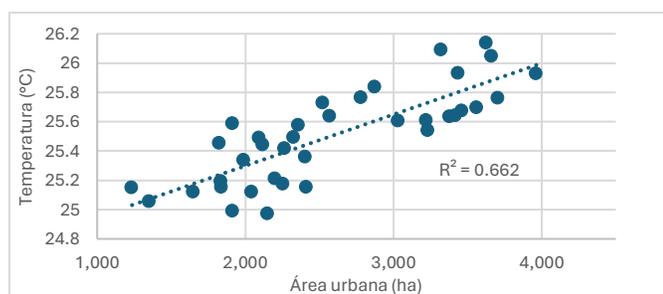


Fig. 7: Correlación entre las temperaturas medias de la ciudad de Iquitos y su área urbana en el periodo 1984-2020.

Otra correlación que se destaca es la moderada relación inversa ( $R^2 = 0.44$ ) que tienen la variación del área urbana con el valor  $NDVI$  máximo ( $NDVI_{max}$ ), que mostraría el efecto del incremento de las temperaturas y la reducción de las precipitaciones sobre los ecosistemas del ámbito. Teniendo en consideración que el  $NDVI_{max}$  indica el estado fenológico de la

vegetación más vigorosa (en la mayoría de los casos bosques), las temperaturas más elevadas reducirán la vigorosidad de esta vegetación, al afectar su balance hídrico, porque contará con menos humedad en el suelo (por la mayor evaporación), además de perder agua en la regulación de su temperatura interna a través de la transpiración.

Es importante precisar que las fluctuaciones presentes en el área urbana para cada año no se deben a eventuales reducciones en la extensión de la ciudad, sino que se debieron a las condiciones meteorológicas que se presentaron en las fechas de captura de cada una de las imágenes utilizadas, como la presencia de nubes sobre el área de estudio, o mayores precipitaciones en algunos años permitiendo un mejor estado fenológico de la vegetación dentro de la ciudad y zonas periurbanas, por lo que parte de su extensión tuvo valores  $NDVI$  superiores a 0.3 y no fueron contabilizadas como áreas descubiertas; por el contrario, en años más secos el área descubierta se habría incrementado, al no haber crecido vegetación herbácea estacional por falta de agua, ingresando a la contabilidad de la extensión urbana y zonas sin cobertura vegetal.

La problemática de Iquitos no es un caso aislado, ya que según [47], Ecuador y Brasil también asocian el crecimiento poblacional de sus ciudades amazónicas como causa de la deforestación, debido al crecimiento poblacional, impulsado inicialmente por una migración interna del campo a la ciudad y el incremento en la tasa de natalidad, lo que ocasiona una mayor demanda de tierras para el asentamiento y la producción de bienes que abastezcan a esta nueva población. A su vez, esta situación se ve agravada por ocurrir en países en vías de desarrollo, carentes de institucionalidad, dependientes de la sobreexplotación de recursos y que invierten poco en la preservación de sus ecosistemas naturales. Ante ello, las municipalidades, el gobierno regional, sociedad civil y demás instituciones involucradas en la problemática deberían desarrollar un plan concertado para la expansión urbana de Iquitos, que defina los espacios más adecuados para su crecimiento, que brinden las condiciones y facilidades necesarias para el establecimiento ordenado de futuras poblaciones, y a su vez permita la conservación de bosques naturales periurbanos. Asimismo, se debería establecer la imposición de sanciones o sobrecostos a aquellos que incumplan sus disposiciones o que decidan afectar espacios fuera de las zonas habilitadas, con el fin de compensar los impactos que generen sobre los ecosistemas, el clima local y las condiciones de vida de los ciudadanos.

Con relación a las variaciones de las temperaturas, se observa que existe una mayor coincidencia entre Iquitos y Trompeteros en la ocurrencia de años más fríos o cálidos, con relación a Pebas que presenta tendencias similares, pero con algunas variantes que no coinciden con las otras dos locaciones. Esto se debería a su ubicación geográfica, porque tanto Trompeteros como Iquitos, están ubicados a una misma latitud ( $3^{\circ}46' S$ ), por lo que tendrán una mayor probabilidad de ser afectadas por una misma masa de aire, a diferencia de Pebas

que al estar más alejada hacia el oriente, a una menor latitud (3°18' S), y presentar vientos predominantes de dirección norte y sur, tiene una menor probabilidad de que las masas de aire que pasan sobre su territorio puedan llegar hasta las otras dos localidades.

Sin embargo, al hacer las correlaciones entre las temperaturas que registra cada cuadrante, se encontró una relación más fuerte entre las temperaturas de Iquitos y Pebas, que se debería a la mayor extensión de territorios alterados que tienen para fines agropecuarios y urbanos. Ello coincide con el menor  $NDVI_{med}$  que presentan ambas locaciones en relación con Trompeteros, cuyo territorio tiene un mejor estado de conservación, pues al 2018 mantenía más del 97% de su área con bosques naturales.

También se encontró una mayor correlación entre las temperaturas medias del cuadrante de Iquitos con los registros de variaciones anuales de la temperatura global ( $R^2=0.639$ ), que se debería a la mayor superficie que tiene con CUS (38%) expuesta a la radiación solar, en contraste a Pebas que tiene solo un 7% de su territorio alterado, y Trompeteros con apenas un 1%, según el mapa de ecosistemas de MINAM [48]. Este resultado indicaría que el ámbito de Trompeteros es menos afectado por el calentamiento global, debido al mayor enfriamiento de la superficie que tienen sus bosques; y porque al tener menos área deforestada, sus suelos no han perdido capacidad de retención del agua por el incremento de la porosidad que genera el desbosque, como lo refiere da Silva et al. [16].

Como lo mencionan diferentes autores, la expansión de las ciudades en zonas tropicales no es exclusiva en nuestro país y lo más probable es que no se pueda detener, por esa razón es importante plantear alternativas que atenúen o reduzcan algunos de estos impactos, como lo demuestra Galdino et al. [49], planteando que el esquema de planificación urbana en una ciudad tropical, debe contemplar la creación de bosques urbanos o utilizar fragmentos ya existentes de bosques en el territorio [49], que reduzca el área pavimentada expuesta a los rayos solares, para atenuar las temperaturas en el día, incrementar el aporte de vapor a la atmósfera, y mejorar el paisaje urbano, con la finalidad de dar una mejor calidad de vida a sus habitantes.

Asimismo, se puede afirmar que entre las zonas que han tenido un CUS en el área de estudio, el mayor impacto en las condiciones atmosféricas se ha dado en la ciudad de Iquitos, donde las temperaturas se han incrementado y las precipitaciones se han reducido con mayor intensidad, superando los efectos que generan las zonas con producción agropecuaria y terrenos en descanso ubicadas en su periferia, cuyos efectos degradan el estado fenológico de la vegetación como lo evidencia la reducción de los valores  $NDVI$ . En ese sentido se confirma lo manifestado por Martins et al. [50], que, aunque el área ocupada por las ciudades en la Amazonía es mucho menor en comparación a la de los pastos y tierras de ganadería, sus impactos en el ambiente tienden a ser mucho más severos.

Finalmente, las principales instituciones competentes como MINAM, Ministerio de Educación, Gobierno Regional de Loreto y municipalidades provinciales y distritales deberían implementar un programa en conjunto de sensibilización ambiental, orientado a promover la valoración de los bosques y ecosistemas naturales presentes en los alrededores de la ciudad de Iquitos, que favorezca su conservación y/o recuperación. De igual manera, las instituciones competentes, pueden difundir y promover el desarrollo de bionegocios y otras actividades que aprovechen el valor de los bosques primarios en pie y otros ecosistemas amazónicos bien conservados, que permita el desarrollo de poblaciones locales, sin degradar las condiciones ambientales de la zona.

## VI. CONCLUSIONES

Los impactos en el clima local del CUS para urbanización en pluvilsas como la Amazonía, aunque focalizados, son más intensos que los CUS generados para fines agropecuarios, como la formación de una isla de calor en la ciudad, que incrementa las temperaturas medias en varios grados con relación a zonas rurales cercanas, y cuya expansión en el tiempo provoca que estas temperaturas asciendan. En ambos casos, los CUS se producen por el crecimiento poblacional de ciudades como Iquitos, con una expansión constante del área urbana y zonas productivas en sus alrededores, impulsando la deforestación de bosques primarios para satisfacer las crecientes necesidades de espacios para el asentamiento, producción de alimentos y bienes, así como la implementación de infraestructura vial, que en países en vías de desarrollo como Perú, se dan de forma descontrolada y desordenada por la débil institucionalidad que los caracteriza.

Por tanto, la deforestación incrementaría el efecto del calentamiento global sobre el clima local, al perder servicios ambientales del bosque como el enfriamiento de superficies y el aporte de humedad, haciendo que tras un ligero incremento las precipitaciones descendan, y que la energía solar, utilizada por árboles en la fotosíntesis y evapotranspiración, ahora irradie la superficie, elevando sus temperaturas, que a su vez afectará negativamente la vigorosidad de la vegetación, por la alteración del balance hídrico del suelo y la pérdida de agua por una mayor transpiración. Por lo que se puede deducir que el impacto que tiene el calentamiento global sobre el clima local de una determinada región será menor, cuanto mejor conservada esté su vegetación nativa.

## REFERENCIAS

- [1] FAO, *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020*. FAO, 2020. doi: 10.4060/ca8753es.
- [2] S. Saatchi et al., "Detecting vulnerability of humid tropical forests to multiple stressors," *One Earth*, vol. 4, no. 7, pp. 988–1003, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.oneear.2021.06.002.
- [3] I. Calixto, "CAMBIOS DE USO DE SUELO Y ECOLOGÍA VIAL EN LA AMAZONÍA PERUANA: UNA REVISIÓN CRÍTICA," PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, Lima, 2019. Accessed: Jan. 04, 2024. [Online]. Available: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/15>

- 351/CALIXTO\_AGUILAR\_INGRID\_CAMBIOS\_USO\_SUELOS.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- [4] A. S. Aucahuasi-Almidon and E. Segura-Ttito, "Análisis de la tendencia a largo plazo de la precipitación y la temperatura del aire en la ciudad de Puerto Maldonado, Amazonía peruana," *Revista Amazónica de Ciencias Básicas y Aplicadas*, vol. 1, no. 2, 2022, doi: 10.55873/racba.v1i2.184.
  - [5] L. A. Parsons *et al.*, "Tropical deforestation accelerates local warming and loss of safe outdoor working hours," *One Earth*, vol. 4, no. 12, pp. 1730–1740, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.oneear.2021.11.016.
  - [6] M. E. Newman, K. P. McLaren, and B. S. Wilson, "Assessing deforestation and fragmentation in a tropical moist forest over 68 years; the impact of roads and legal protection in the Cockpit Country, Jamaica," *For Ecol Manage*, vol. 315, pp. 138–152, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.foreco.2013.12.033.
  - [7] C. P. Barber, M. A. Cochrane, C. M. Souza, and W. F. Laurance, "Roads, deforestation, and the mitigating effect of protected areas in the Amazon," *Biol Conserv*, vol. 177, pp. 203–209, 2014, doi: 10.1016/j.biocon.2014.07.004.
  - [8] V. Bax and W. Francesconi, "Environmental predictors of forest change: An analysis of natural predisposition to deforestation in the tropical Andes region, Peru," *Applied Geography*, vol. 91, pp. 99–110, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.apgeog.2018.01.002.
  - [9] N. B. R. Briceño, E. B. Castillo, J. L. M. Quintana, S. M. O. Cruz, and R. S. López, "Deforestation in the peruvian Amazon: Indexes of Land Cover/Land Use (LC/LU) changes based on GIS," *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, no. 81, 2019, doi: 10.21138/bage.2538a.
  - [10] RAISG, "Deforestación en la Amazonía al 2025 - Bajo un enfoque de accesibilidad al bosque," Sep. 2022. Accessed: Jan. 07, 2024. [Online]. Available: [https://infoamazonia.org/wp-content/uploads/2023/03/DEFORESTACION-AMAZONIA-2025\\_21032023.pdf](https://infoamazonia.org/wp-content/uploads/2023/03/DEFORESTACION-AMAZONIA-2025_21032023.pdf)
  - [11] Y. Berhanu, G. Dalle, D. W. Sintayehu, G. Kelboro, and A. Nigussie, "Land use/land cover dynamics driven changes in woody species diversity and ecosystem services value in tropical rainforest frontier: A 20-year history," *Heliyon*, vol. 9, no. 2, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13711.
  - [12] G. A. Carrillo-Niquete, J. L. Andrade, J. R. Valdez-Lazalde, C. Reyes-García, and J. L. Hernández-Stefanoni, "Characterizing spatial and temporal deforestation and its effects on surface urban heat islands in a tropical city using Landsat time series," *Landsc Urban Plan*, vol. 217, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.landurbplan.2021.104280.
  - [13] W. Dai and W. Dai, "Effects of urban expansion on environment by morphological study," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/227/5/052004.
  - [14] C. A. Nobre, G. Sampaio, L. S. Borma, J. C. Castilla-Rubio, J. S. Silva, and M. Cardoso, "Land-use and climate change risks in the amazon and the need of a novel sustainable development paradigm," *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 113, no. 39, pp. 10759–10768, Feb. 2016, doi: 10.1073/pnas.1605516113.
  - [15] C. A. Nobre, G. Sampaio, L. S. Borma, J. C. Castilla-Rubio, J. S. Silva, and M. Cardoso, "Land-use and climate change risks in the amazon and the need of a novel sustainable development paradigm," *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 113, no. 39, pp. 10759–10768, Sep. 2016, doi: 10.1073/pnas.1605516113.
  - [16] T. G. F. da Silva *et al.*, "Soil properties and microclimate of two predominant landscapes in the Brazilian semiarid region: Comparison between a seasonally dry tropical forest and a deforested area," *Soil Tillage Res*, vol. 207, p. 104852, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.still.2020.104852.
  - [17] Y. L. F. Santos *et al.*, "Amazon deforestation and urban expansion: Simulating future growth in the Manaus Metropolitan Region, Brazil," *J Environ Manage*, vol. 304, 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.114279.
  - [18] N. A. S. Kasniza Jumari *et al.*, "Analysis of urban heat islands with landsat satellite images and GIS in Kuala Lumpur Metropolitan City," *Heliyon*, vol. 9, no. 8, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e18424.
  - [19] J. Wu, C. X. Qin, Y. Yue, S. P. Cheng, H. Zeng, and L. Y. He, "Comprehensive effects of climate, land use/cover and management practices on runoff and nutrient variations in a rapidly urbanizing watershed," *Chemosphere*, vol. 349, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.140934.
  - [20] S. Wongchui *et al.*, "Changes in the surface and atmospheric water budget due to projected Amazon deforestation: Lessons from a fully coupled model simulation," *J Hydrol (Amst)*, vol. 625, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.130082.
  - [21] D. John and C. Zhang, "An attention-based U-Net for detecting deforestation within satellite sensor imagery," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 107, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.jag.2022.102685.
  - [22] K. Zaman, "Environmental cost of deforestation in Brazil's Amazon Rainforest: Controlling biocapacity deficit and renewable wastes for conserving forest resources," *For Ecol Manage*, vol. 504, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.foreco.2021.119854.
  - [23] A. Alzu'bi and L. Alsmadi, "Monitoring deforestation in Jordan using deep semantic segmentation with satellite imagery," *Ecol Inform*, vol. 70, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.ecoinf.2022.101745.
  - [24] J. J. P. Vega, R. Zárate-Gómez, R. J. M. Vela, M. M. Brañas, and J. E. B. Rios, "Predicción de la pérdida de la cobertura vegetal por aumento de áreas urbanas en Iquitos, Perú," *Ciencia Amazónica (Iquitos)*, vol. 7, no. 1, pp. 37–50, Feb. 2020, doi: 10.22386/ca.v7i1.263.
  - [25] D. Buu-Sao, "Etnografía de una organización de estudiantes indígenas en la amazonía peruana: las ambivalencias de la protesta," *Silex*, vol. 9, no. 1, 2019, doi: 10.53870/uarm2019.n134.
  - [26] Parlamento Andino, "Iquitos, la ciudad más grande de la Amazonía peruana." Accessed: Jan. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.parlamentoandino.org/index.php/actualidad/noticias/525-iquitos-la-ciudad-mas-grande-de-la-amazonia-peruana>
  - [27] INEI, "Perú: Proyecciones de Población Total, según Departamento, Provincia y Distrito, 2018 - 2022," Lima, Apr. 2022. Accessed: Jan. 09, 2024. [Online]. Available: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3624028/Per%C3%B3A%3A%20Proyecciones%20de%20Poblaci%C3%B3n%20Total%20eg%C3%BA%20Departamento%2C%20Provincia%20y%20Distrito%2C%202018-2022.pdf?v=1701294767>
  - [28] Municipalidad Provincial de Maynas, "Plan de Desarrollo Urbano Sostenible De Iquitos 2011-2021," *Tomo II*, vol. 2, 2011.
  - [29] M. Mayo D'Arrigo, "Retos climáticos de la ciudad de Iquitos en Perú," *Proyección 22*, vol. 6, Dec. 2017, Accessed: Jan. 25, 2024. [Online]. Available: [https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos\\_digitales/12687/10darrigo-proyeccion22.pdf](https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/12687/10darrigo-proyeccion22.pdf)
  - [30] INEI, *Resultados Definitivos del departamento de Loreto.*, vol. 1. Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2018.
  - [31] R. Hausmann, M. Á. Santos, Muci. Frank, J. T. Pye, A. Grisanti, and J. Lu, "Diagnóstico de Crecimiento de Loreto: Principales Restricciones al Desarrollo Sostenible," 387, Nov. 2020. Accessed: Jan. 04, 2024. [Online]. Available: <https://growthlab.hks.harvard.edu/files/growthlab/files/2020-11-cid-wp-387-loreto-growth-diagnostic-es.pdf>
  - [32] Defensoría del Pueblo, "Deforestación por cultivos agroindustriales de palma aceitera y cacao. Entre la ilegalidad y la ineficacia del Estado," Lima, Jun. 2017. [Online]. Available: <http://www.defensoria.gob.pe>
  - [33] INEI, *Resultados definitivos de los Censos Nacionales 2017*. Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2018. Accessed: Jan. 25, 2024. [Online]. Available: [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1561/](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1561/)
  - [34] INEI, "LORETO - RESULTADOS DEFINITIVOS: Población Económicamente Activa," Lima, Dec. 2018. Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1622/16TOMO\\_01.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1622/16TOMO_01.pdf)
  - [35] MIDAGRI and MEF, "Guía para el cumplimiento de la Meta 7 del Programa de Incentivos a la Mejora de la Gestión Municipal correspondiente al año 2022. 'ADOPCIÓN DE PRÁCTICAS

MEJORADAS POR PRODUCTORES Y PRODUCTORAS DE CULTIVOS TRANSITORIOS PARA OPTIMIZAR LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA,” 2022. [Online]. Available: [www.gob.pe/mef](http://www.gob.pe/mef)

- [36] C. Peña, “RELACIÓN DE LAS ACTIVIDADES SOCIOECONÓMICAS CON LA DEFORESTACIÓN DEL BOSQUE DE LA CUENCA DEL AMPIYACU EN EL PERIODO 2000 – 2010 LORETO, PERÚ;” Para optar el Título de Ingeniero en Ecología de Bosques Tropicales , ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ECOLOGÍA DE BOSQUES TROPICALES , Iquitos, 2015. Accessed: Jan. 10, 2024. [Online]. Available: [https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12737/4966/Claudia\\_Tesis\\_Titulo\\_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12737/4966/Claudia_Tesis_Titulo_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [37] MTC, “Estudio de Navegabilidad de los ríos Marañón y Amazonas, Tramo: Saramiriza - Santa Rosa,” 2008. Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: <https://portal.mtc.gob.pe/transportes/acuatico/documentos/estudios/Infomaci%C3%B3n%20Socioecon%C3%B3mica.pdf>
- [38] RPP, “Loreto: bloqueo en Lote 8 impide producción de 5,000 barriles de crudo por día.”
- [39] MINAM, “Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú - Memoria descriptiva .” May 2019. Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: <https://geoservidor.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/MEMORIA-DESCRIPTIVA-MAPA-DE-ECOSISTEMAS.pdf>
- [40] NASA, “Global Climate Change - Vital Signs of the Planet,” California Institute of Technology. Accessed: Feb. 12, 2024. [Online]. Available: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>
- [41] Japanese Meteorological Agency, “Annual Anomalies of Global Average Surface Temperature (1891 - 2023).” Accessed: Feb. 12, 2024. [Online]. Available: [https://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/gwp/temp/ann\\_wld.html](https://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/gwp/temp/ann_wld.html)
- [42] Met Office Hadley Centre, “Met Office Hadley Centre observations datasets.” Accessed: Feb. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut5/>
- [43] MINAM, “Geoservidor.” Accessed: Feb. 12, 2024. [Online]. Available: <https://geoservidor.minam.gob.pe/recursos/intercambio-de-datos/>
- [44] G. Poveda and O. J. Mesa, “Efectos hidrológicos de la Deforestación,” *Energética*, no. 16, 1995.
- [45] Y. Mu and C. Jones, “An observational analysis of precipitation and deforestation age in the Brazilian Legal Amazon,” *Atmos Res*, vol. 271, p. 106122, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.ATMOSRES.2022.106122.
- [46] E. Correa, S. Flores, and G. Lesino, “ISLA DE CALOR URBANA: EFECTO DE LOS PAVIMENTOS. INFORME DE AVANCE,” *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 7, no. 0329–5184, 2003.
- [47] P. Jarrín, L. Tapia, and G. Zamora, “Demografía y transformación territorial: medio siglo de cambio en la región amazónica de Ecuador,” *Eutopía, Revista de Desarrollo Económico Territorial*, no. 12, 2017.
- [48] MINAM, “Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú - Memoria descriptiva .” Feb. 2019. [Online]. Available: <https://geoservidor.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/MEMORIA-DESCRIPTIVA-MAPA-DE-ECOSISTEMAS.pdf>
- [49] V. L. Galdino, R. Cielo-Filho, C. D. Câmara, and M. B. Costa, “A planning framework to guide the creation of urban green spaces using existing forest fragments in the urban territory: A case study from Foz do Iguaçu, Brazil,” *Trees, Forests and People*, vol. 10, 2022, doi: 10.1016/j.tfp.2022.100347.
- [50] R. T. Martins, S. R. M. Couceiro, A. S. Melo, M. P. Moreira, and N. Hamada, “Effects of urbanization on stream benthic invertebrate communities in Central Amazon,” *Ecol Indic*, vol. 73, 2017, doi: 10.1016/j.ecolind.2016.10.013.