



**DEPARTAMENTO
DE POSGRADOS**



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

DEPARTAMENTO DE POSGRADOS

Maestría en Cambio Climático Agricultura y Desarrollo Rural Sostenible - MACCARD

El efecto de la intensificación agrícola y expansión de centros poblados y su
relación con variables climáticas locales, caso de estudio de la Amazonia
ecuatoriana

Trabajo previo a la obtención del título de:

Magister en Cambio Climático Agricultura y Desarrollo Rural Sostenible

Nombre del autor:

Doris Álvarez Lozano

Nombre de los directores:

Prof. Andrea Urgilez-Clavijo, PhD. (c)

Prof. David Rivas-Tabares, PhD.

**Cuenca – Ecuador
2024**

Dedicatoria

Para ti mi Fiorella, eres ese motor que mueve mi vida, todos y cada uno de mis logros son para ti hija mía, porque eres lo más grande que tengo. También para ustedes mamá y papá, nada de esto sería posible sin su apoyo incondicional. Su presencia en mi vida ha sido mi fortaleza y mi ejemplo para salir adelante, son mis personas favoritas y se merecen mucho más de lo poco que puedo ofrecerles. ¡Gracias Dios por tan grande bendición!

Agradecimientos

Agradezco de sobremanera a mi familia por todas sus muestras de apoyo y ánimo cuando las fuerzas decaían, a ti mi niña por entender mis ausencias y motivarme con tus muestras de cariño.

De igual manera a cada uno de los docentes del Programa MACCARD "Máster en Cambio Climático, Agricultura y Desarrollo Rural Sostenible" por compartirnos sus conocimientos, fue sin duda una experiencia enriquecedora personal y profesionalmente; de manera especial a mis directores de tesis, Profesores Andrea Urgilez y David Rivas por ser esos mentores de sueños y esas personas vitamina que incentivan a ser una mejor versión cada día.

Resumen

La expansión agrícola y la urbanización en la Amazonía ecuatoriana han generado cambios significativos en el clima local entre los años 2000 y 2018. Este estudio analizó estas transformaciones utilizando mapas de cobertura y uso del suelo, además de un conjunto de variables climáticas como la humedad relativa, la temperatura, la velocidad del viento, y variables asociadas como el albedo y el índice NDVI. Se extrajeron series temporales de 245 puntos de datos, las cuales fueron evaluadas mediante el uso de z-score para detectar anomalías climáticas. Los resultados revelan que la urbanización está asociada a anomalías climáticas marcadas, particularmente en las temperaturas máximas y mínimas, que muestran tendencias opuestas tras el año 2010. En cambio, la expansión agrícola provocó anomalías más extremas, especialmente en la temperatura media, con valores superiores a +9 desviaciones estándar, y en el albedo NIR, que alcanzó más de +10 desviaciones estándar. Además, se observaron fluctuaciones importantes en la humedad relativa y el viento, destacándose en la segunda mitad del año. Las anomalías asociadas a la expansión agrícola fueron más intensas y persistentes que aquellas generadas por la urbanización, lo que sugiere una mayor influencia de la cobertura agropecuaria en el clima local. Estas diferencias regionales también reflejan la variabilidad temporal de los efectos climáticos, con zonas agrícolas que presentan mayores anomalías en comparación con áreas urbanizadas. Las temperaturas extremas, tanto máximas como mínimas, se correlacionaron con anomalías severas en la zona sur del país, especialmente a partir de 2010. Este enfoque, que agrupa las variaciones climáticas por zonas, facilita la comprensión de cómo los cambios locales en la cobertura del suelo impactan en el clima regional, proporcionando información valiosa para los tomadores de decisiones en la planificación de políticas sostenibles y la armonización de intereses entre zonas rurales y urbanas.

Palabras clave

Cambios en el uso y la cobertura del suelo; variabilidad climática; ecología del paisaje; intensificación y rotación agrícola, urbanización.

Abstract

Agricultural expansion and urbanization in the Ecuadorian Amazon have significantly impacted local climate between 2000 and 2018. This study analyzed these transformations using land cover and land use maps, along with a set of climatic variables such as relative humidity, temperature, wind speed, and linked variables such as albedo, and NDVI. Time series were extracted from 245 data points, which were evaluated using z-scores to detect climate anomalies. The results reveal that urbanization is associated with pronounced climate anomalies, particularly in maximum and minimum temperatures, which show opposite trends after 2010. In contrast, agricultural expansion led to more extreme anomalies, especially in mean temperature, with values exceeding +9 standard deviations, and in NIR albedo, which reached over +10 standard deviations. Additionally, significant fluctuations were observed in relative humidity and wind speed, particularly during the second half of the year. Anomalies associated with agricultural expansion were more intense and persistent than those generated by urbanization, suggesting a greater influence of agricultural land cover on local climate. These regional differences also reflect the temporal variability of climatic effects, with agricultural zones showing larger anomalies compared to urbanized areas. Extreme temperatures, both maximum and minimum, correlated with severe anomalies in the southern region of the country, especially after 2010. This approach, which groups climate variations by zone, enhances the understanding of how local land cover changes affect regional climate. It provides valuable insights for decision-makers in the planning of sustainable policies and the harmonization of interests between rural and urban areas.

Keywords

Land Use and Land Cover Change; climate variabilities; Landscape Ecology; intensification and rotational farming, urbanization.

Contenidos

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Abstract.....	v
Contenidos.....	vi
Índice de figuras.....	viii
Índice de tablas.....	ix
1. Introducción.....	1
2. Materiales y métodos	4
2.1 Área de estudio	4
2.2 Fuentes y selección de datos.....	5
2.2.1 Mapas de cobertura y uso de suelo.....	5
2.2.2 Variables climáticas.....	6
2.2.3 Albedo y NDVI	7
2.3 Procesamiento de datos.....	9
2.3.1 Localización de parches de urbanización y expansión agrícola	9
2.3.2 Armonización geométrica de los parches y las variables climáticas.....	9
2.3.3 Selección de centroides coincidentes.....	11
2.3.4 Extracción de series temporales de variables climáticas, albedo y NDVI	11
2.3.5 Tratamiento de las series temporales.....	12
2.4 Metodología LCV-LULCC.....	16
2.4.1 Relación biogeográfica y climática local	16
2.4.2 Respuesta climática esperada a partir de las transiciones de CUS.....	19
2.4.3 Representación gráfica del comportamiento y estadísticos de las variables climáticas, albedo y NDVI	20
3. Resultados.....	21
3.1 Acoplamiento espacial de las transiciones de CUS con las variables climáticas, albedo, y NDVI	21
3.2 Comportamiento general mensual de las anomalías de las variables climáticas, albedo, y NDVI en los procesos de urbanización y expansión agrícola	23
3.3 Respuesta climática esperada general y por zonificación	25
3.3.1 Mapas de calor.....	25

3.3.1.1	Expansión urbana.....	26
3.3.1.2	Expansión agrícola	30
3.3.2	Efectos de la variación climática en la Sierra	33
3.3.2.1	Expansión agrícola	33
3.3.2.2	Urbanización	39
3.4	Discusión.....	47
3.5	Limitaciones.....	50
3.5.1	Incertidumbres asociadas a las transiciones.....	50
3.5.2	Efecto de la temporalidad del análisis	51
3.6	Conclusiones.....	51
3.7	Bibliografía.....	53

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación geográfica de la Amazonía Ecuatoriana	5
Figura 2. Zonificación de la región biogeográfica amazónica del Ecuador. Al lado izquierdo se encuentra la segmentación por latitud y al lado izquierdo la segmentación por longitud.	13
Figura 3. Cuadrículas de zonificación de zonas altas y zonas bajas para los procesos de urbanización y expansión agrícola.	14
Figura 4. Distribución espacial de los centroides seleccionados para urbanización y expansión agrícola después del proceso de armonización geométrica	23
Figura 5. Evolución de las variables climáticas, albedo, y NDVI para los años 2000 y 2018 de los procesos de urbanización (izquierda) y expansión agrícola (derecha) agregados mensualmente.	24
Figura 6. Mapas de calor de los z-score de las series temporales de las variables climáticas, albedo y NDVI para el proceso de urbanización.....	27
Figura 7. Mapas de calor de los z-score de las series temporales de las variables climáticas, albedo y NDVI para el proceso de expansión agrícola.	32
Figura 8. Diagrama de cajas y violines de las variables climáticas, albedo y NDVI en las tierras altas de la zona norte del proceso de expansión agrícola.	34
Figura 9. Diagrama de cajas y violines de las variables climáticas, albedo y NDVI en las tierras altas de la zona media del proceso de expansión agrícola.	36
Figura 10. Diagrama de cajas y violines de las variables climáticas, albedo, NDVI en las tierras altas de la zona sur del proceso de expansión agrícola.	38
Figura 11. Diagrama de cajas y violines de las variables climáticas, albedo y el NDVI en las tierras altas de la zona norte del proceso de urbanización.	40
Figura 12. Diagrama de cajas y violines de las variables climáticas, albedo, y NDVI en las tierras altas de la zona media del proceso de urbanización.	41
Figura 13. Diagrama de cajas y violines de las variables climáticas, albedo, y NDVI en las tierras altas de la zona sur del proceso de urbanización.	43
Figura 14. Diagrama de cajas y violines de las variables climáticas, albedo, y NDVI en las tierras bajas de la zona norte del proceso de urbanización.	44
Figura 15. Diagrama de cajas y violines de las variables climáticas el albedo y el NDVI en las tierras bajas de la zona media del proceso de urbanización.....	46

Índice de tablas

Tabla 1. Especificaciones técnicas de las variables climáticas del producto CHELSA Versión 2.1.	7
Tabla 2. Percepción de la respuesta climática esperada a los procesos de urbanización y expansión agrícola según segmentación por longitud.	20
Tabla 3. Superficie de cobertura que cambio a urbanización (ganancias a partir de otras coberturas) desde el año 2000 al 2018 en la región biogeográfica Amazónica.	22
Tabla 4. Superficie de cobertura que cambio a intensificación y rotación agropecuaria (ganancias a partir de otras coberturas) desde el año 2000 al 2018 en la región Biogeográfica Amazónica.	22
Tabla 5. Cantidad de píxeles por producto satelital que contienen un 70% de la superficie de los parches identificados como urbanización y expansión agrícola.	23
Tabla 6. Métricas de evaluación de los puntos de monitoreo de las variables climáticas seleccionadas en las tierras altas de la zona norte para el proceso de expansión agrícola.	35
Tabla 7. Métricas de evaluación de los puntos de monitoreo de las variables climáticas seleccionadas en las tierras altas de la zona media para el proceso de expansión agrícola.	37
Tabla 8. Métricas de evaluación de los puntos de monitoreo de las variables climáticas seleccionadas en las tierras altas de la zona sur para el proceso de expansión agrícola.	38
Tabla 9. Métricas de evaluación de los puntos de monitoreo de las variables climáticas seleccionadas en las tierras bajas zona norte para el proceso de urbanización.	41
Tabla 10. Métricas de evaluación de los puntos de monitoreo de las variables climáticas seleccionadas en las tierras altas zona media para el proceso de urbanización.	42
Tabla 11. Métricas de evaluación de los puntos de monitoreo de las variables climáticas seleccionadas en las tierras altas zona norte para el proceso de urbanización.	43
Tabla 12. Métricas de evaluación de los puntos de monitoreo de las variables climáticas seleccionadas en las tierras bajas zona norte para el proceso de urbanización.	45
Tabla 13. Métricas de evaluación de los puntos de monitoreo de las variables climáticas seleccionadas en las tierras bajas zona media para el proceso de urbanización.	46

1. Introducción

A lo largo de la historia han existido presiones por el aprovechamiento del suelo, en especial en áreas ricas en recursos naturales de relevancia económica. La explotación en estas áreas ha tenido un impacto en la biodiversidad, la abundancia de especies, y el clima a diferentes escalas. Al respecto se han llevado a cabo estudios para: medir el impacto de la gestión forestal en la riqueza de especies [1], analizar los efectos globales del uso del suelo en la biodiversidad a escala local [2], estudiar la relación entre el cambio de cobertura y uso de uso de suelo (CUS) y la temperatura superficial [3]. Estos estudios aportan significativamente para mejorar la comprensión de la respuesta del medio ambiente a las modificaciones en la CUS a causa de los procesos naturales y actividades antrópicas.

La cobertura del suelo es la marca más visible de las modificaciones que ha sufrido el territorio a causa de la intervención humana [4]. En este sentido, la transformación de bosques primarios en suelos agrícolas y urbanizados por la creciente demanda de alimentos y vivienda, ha ocasionado importantes modificaciones en la composición y configuración del paisaje; siendo una de ellas la fragmentación del bosque [5,6], que afecta a los servicios ecosistémicos, los cuales están encargados de atenuar algunos impactos locales y globales asociados con el ciclo del agua [7], la erosión del suelo [8], el clima [9], etc. Por lo que la comprensión y el monitoreo de la dinámica del cambio de CUS es indispensable para tomar decisiones territoriales a mediano y largo plazo en beneficio de los habitantes locales y con repercusión a escalas globales.

La variabilidad climática es el resultado de la interacción de múltiples factores como las emisiones de gases de efecto invernadero, la aplicación de compuestos volátiles contaminantes, el aumento del nivel del mar, el derretimiento de los polos, y los cambios de CUS [10,11]. Estudios previos han evidenciado las relaciones territoriales con la variabilidad climática [12–14], y han identificado cuatro grandes procesos asociados a la dinámica de la cobertura y uso de suelo que impulsan el cambio climático, los cuales son: la deforestación, la expansión urbana, la expansión e intensificación agrícola y la explotación minera/petrolera.

A causa de la deforestación a nivel mundial entre 2001 y 2022 se registró una pérdida del 23% de la masa forestal [15]. Además, existe evidencia de que en escalas pequeñas/locales las mediciones directas de la atmósfera sobre tierras boscosas y deforestadas en la Amazonia indican que la temperatura de la superficie aumenta y la evapotranspiración se reduce cuando el bosque tropical se convierte en pastos, particularmente en la estación seca [16–18]. Con respecto a la expansión urbana, existe evidencias de que

el incremento de tejidos urbanos produce modificaciones en el clima debido al aumento demográfico [19–21]. Según las Naciones Unidas el 54% de la población mundial vive en áreas urbanas y se prevé que la superficie urbanizada se triplique entre el 2000 y 2030 [22]. Tanto la deforestación como la expansión urbana han provocado una degradación en los ecosistemas y paisajes lo cual se ha visto reflejado en las variables climáticas como la temperatura [23,24], albedo [25,26], viento [27–29] y otras [30,31]. Son diversos autores los que ratifican la necesidad del estudio de la relación entre la variabilidad climática y el cambio de CUS en términos de gestión del territorio y acciones correctivas que tengan repercusión en todas las escalas de análisis espacial y temporal.

En América del Sur se encuentra el bioma amazónico que alberga el bosque tropical húmedo denso el cual es uno de los ecosistemas más importantes y estratégicos a nivel mundial frente a la dinámica del cambio climático global. Este bioma se encuentra distribuido en ocho países y alberga aproximadamente el 73.3% de bosque natural tropical a 2022 [32], y una gran variedad de especies de importancia funcional y endémica. Este bioma tiene diferentes ecosistemas que están interconectados estrechamente a nivel local, regional y global por lo que su conservación garantiza mantener los servicios ecosistémicos que son agentes trascendentales para enfrentar las variaciones climáticas [33,34]. Dada la importancia estratégica global del bioma Amazónico, todos los trabajos que permitan estudiar su dinámica contribuirán a mejorar el entendimiento y capacidades que este alberga para contrarrestar los efectos del cambio climático a corto, mediano y largo plazo.

Entre 1985 y 2022 el bioma amazónico perdió aproximadamente 51 millones de hectáreas de bosques, que en su mayoría han sido reemplazadas por usos agropecuarios y zonas pobladas [32]. Además, en este bioma se ha explotado la riqueza multidimensional en diferentes frentes tanto por las comunidades indígenas que albergan en su territorio como por grupos privados y empresas transnacionales, dejando las decisiones de gestión del territorio en manos de terceros y escasas responsabilidades legales [35]. En la Amazonía ecuatoriana entre 1985 y 2021 se han perdido aproximadamente 0.5 millones de hectáreas [32]. La demanda de recursos naturales ha favorecido la creación y expansión de centros poblados y ha promovido la intensificación del uso del suelo deforestado a través de diversas actividades agrícolas y ganaderas [36]. De las áreas agropecuarias a nivel nacional alrededor del 88% provino de la pérdida de bosques naturales [37,38]. Estas modificaciones en los ecosistemas naturales podrían causar efectos adversos en el clima de la región que es importante comprender para una mitigación oportuna y la toma de decisiones acertadas.

El análisis de la relación entre el cambio de CUS y la variabilidad climática inicia a partir de la identificación de las transiciones entre categorías: ganancias, pérdidas y persistencias. Asumiendo que las persistencias no generarían ningún efecto adverso en la variabilidad climática local. Posteriormente se integra la relación biogeográfica (topografía, edafología, características de la cuenca hidrográfica, etc.) para identificar el grado de alteración y el patrón del proceso adyacente [6]. Mejorar la comprensión de los procesos territoriales en cadena es el instrumento clave que permite desacelerar, frenar y remediar procesos de alto grado de impacto en los biomas y consecuentemente en la variabilidad climática. La variación en el clima a escala local se puede inferir a partir de ciertas variables como la temperatura superficial [39], la humedad relativa (HR) [40], la velocidad del viento (VV) [41], el albedo [42], e incluso variables que proveen información indirecta como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) [43,44].

Con base en los estudios precedentes y recientes, mejorar la comprensión de la evolución espaciotemporal de algunas de las variables climáticas en puntos con cambios territoriales como la urbanización y la expansión agrícola, resultan de gran utilidad frente a la gestión territorial de escenarios de cambio climático en los próximos años. Algunas investigaciones destacadas han desarrollado incipientemente este alcance [45–48]. Las metodologías hasta hoy empleadas se basan en analizar la variación climática local de puntos concretos en el territorio, sin determinar la armonía geométrica entre la zona con cambio de uso y/o cobertura de suelo a nivel de parche y la resolución espacial de la información climática de satélite. En el presente trabajo un parche [49] deforestado es un polígono que refleja la transición de bosque a suelos agrícola y urbanizado.

La evolución espaciotemporal de variables climáticas a nivel de parche, empleando información de observación de la tierra, no ha sido plenamente documentada, siendo un paso para seguir dentro del estudio climático local y su relación con el cambio de CUS. Recientes estudios resaltan la ausencia de metodologías que faciliten el análisis de los efectos del CUS en el cambio climático a distintas escalas [11,50,51]. A partir de lo cual, el presente trabajo de investigación pretende responder a las siguientes preguntas: i) ¿es posible vincular información climática de fuentes satelitales con los parches de CUS para análisis locales detallados?, ¿es posible diseñar una metodología para evaluar los efectos de CUS sobre variables climáticas locales?, y ¿es posible determinar las relaciones entre el CUS y el cambio de la climatología local a partir de anomalías? A partir de las anteriores preguntas, este estudio se centra en evaluar la relación existente entre la transformación de la CUS, específicamente de dos procesos, la expansión urbana y la expansión agrícola, con la modificación del clima local/regional que se establece

con base en el análisis multitemporal de series climáticas de las áreas transformadas. Esto con el fin de contribuir a la mejora en la toma de decisiones y establecimiento de medidas a escala local, empleando los instrumentos de planificación o proponiendo unos nuevos con criterios de mitigación y adaptación al cambio climático jurisdiccional. Para tal fin, es necesario contar con una metodología que facilite la comprensión de los efectos, la magnitud y la propagación de estos en el territorio. El presente trabajo pretende contribuir significativamente en este aspecto y que permita evaluar el estado actual de los procesos de expansión de centros poblados e intensificación y rotación agrícola, desde ahora denominados urbanización y expansión agrícola, respectivamente. Este análisis se llevará a cabo en la Amazonía Ecuatoriana diferenciando los efectos que estos pueda llegar a tener en las regiones Sierra y Oriente del Ecuador.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

En Ecuador existen cuatro regiones naturales definidas: la región Insular o Galápagos, la región litoral o costa, la región de los Andes o sierra, y el oriente o región Amazónica. El área de estudio comprende la región biogeográfica de la Amazonía, Figura 1, la cual está ubicada al oeste del Ecuador con una superficie de aproximadamente 131.7 km² que equivale al 53.17 % del país y al mismo tiempo es parte del bioma amazónico y la cuenca del río Amazonas [52]. La Amazonia ecuatoriana representa el 1.6% del bioma amazónico y el 1.3% del total de la cuenca amazónica [53]. Esta zona limita con la Amazonia de los países de Perú y Colombia. Posee destacados ecosistemas acuáticos y terrestres como los bosques inundables, aluviales y siempreverdes piemontanos, arbustales siempre verdes y herbazales inundables entre otros [54]. Además, en sus laderas orientales es de gran importancia el ecosistema altoandino albergando los bosques siempreverdes montanos, ecosistemas herbazales de páramo, y humedales de altura de gran interés estratégico por sus particularidades faunísticas y endémicas [55]. La Amazonia ecuatoriana cumple un rol hidrológico importante por su ubicación en la cuenca alta del río Amazonas donde se forman los primeros afluentes que alimentan a los cauces en las llanuras inundables y tierras bajas amazónicas del Perú y Brasil.

En el Ecuador, el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica – MAATE, que es el ente rector en materia de regulación y control del agua y el ambiente en una de sus políticas nacional, ha declarado áreas protegidas en esta zona en diferentes categorías de manejo, tales como: la Reserva Ecológica Cofán Bermejo, el Parque Nacional Sumaco Napo-Galeras, la Reserva de Producción de Fauna Cuyabeno, la

Reserva Biológica Limoncocha, el Parque Nacional Yasuní, la Reserva Biológica El Cóndor, la Reserva Biológica El Quimi, el Refugio de Vida Silvestre El Zarza, la Reserva Biológica Cerro Plateado. Este conjunto de áreas protegidas ocupa aproximadamente el 27.8% del territorio amazónico [56]. Dada la envergadura y extensión de la Amazonía ecuatoriana, los tomadores de decisión propenden por incrementar el número de estudios territoriales y climáticos en esta zona para mejorar la comprensión de los efectos climáticos adyacentes (i.e., sociales, culturales y económicos), en este sector sensible de cabecera del bioma Amazónico, debido a las actividades antrópicas.



Figura 1. Ubicación geográfica de la Amazonía Ecuatoriana

La región biogeográfica amazónica del Ecuador comprende todo el oriente ecuatoriano, es decir, 116.4 km² (88.37% del área total de la Amazonia ecuatoriana) así como parte de la región Sierra con tan solo 15.32 km² (11.63% del área total de la Amazonia ecuatoriana). Considerando la delimitación político-administrativa del Ecuador, la región oriental de la Amazonía ecuatoriana incluye las provincias de Sucumbíos, Napo, Orellana, Pastaza, Morona Santiago y Zamora Chinchipe, y parte de las provincias de Cotopaxi, Tungurahua, Chimborazo, Cañar, Azuay y Loja, pertenecientes a la región de los Andes o Sierra. La región Sierra actualmente concentra el mayor porcentaje de autorizaciones para riego comunitario, lo cual indica una concentración importante de agricultura en la zona [57]. Además, en el oriente hay grandes plantaciones de palma africana especialmente al noreste del país lo cual ha promovido un desplazamiento de la población para ocupar puestos de trabajo en estas zonas [58].

2.2 Fuentes y selección de datos

2.2.1 Mapas de cobertura y uso de suelo

En el presente estudio se utilizaron dos mapas de CUS del MAATE, en formato ráster con una resolución espacial de 30 m. El primer mapa corresponde al año 2000, y el segundo al año 2018. Se consideraron las

categorías correspondientes al nivel 1 de clasificación, la cuales son: bosque, cuerpos de agua, tierra agropecuaria, vegetación arbustiva y herbácea, zona antrópica, y otras tierras. Los mapas de CUS fueron construidos con base en imágenes satelitales de Landsat 7 ETM y 8 OLI y *Aster* y *RapidEye*. La fecha efectiva de las imágenes de satélite sin nubes correspondió a 2 años antes y después de la fecha de referencia. La clasificación de la cobertura del suelo tiene una precisión general de 73% para el mapa de 2000 [59,60] y para el mapa de 2018 esta información no se encuentra disponible.

2.2.2 Variables climáticas

Las variables climáticas locales relacionadas con el cambio de CUS fueron definidas a partir de una revisión de trabajos precedentes, especialmente de aquellos trabajos que consideran los procesos de urbanización y expansión agrícola. Aunque existen pocos estudios que analizan estos dos procesos paralelamente, se han considerado aquellos estudios que vinculan las variables climáticas y estos procesos por separado [61–68]. Para llevar a cabo del presente estudio, se seleccionaron cinco variables climáticas: la humedad relativa (HR), velocidad del viento (VV), temperatura media (TMed.), temperatura máxima (TMáx.), y temperatura mínima (TMín.). La escasez de estaciones meteorológicas en la Amazonía ecuatoriana, administradas por el Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología (INAHMI), hace que esta fuente principal de datos haya sido descartada para el análisis a escala local del presente estudio. Además, debido a la extensión del área de estudio se consideró emplear datos de teledetección e información satelital como una alternativa viable para evaluar las variaciones climáticas locales. Al no encontrarse ninguna de las estaciones en tierra de la red INHAMI, dentro de los parches identificados como urbanización y expansión agrícola, no fue posible realizar una validación entre la información satelital y los datos de estaciones meteorológicas oficiales.

Los datos de las variables climáticas fueron descargadas utilizando la plataforma denominada “*Climate at high resolution for the earth’s land surface areas*”. En específico se emplearon los datos de la versión CHELSA V.2.1 [69] (<https://chelsa-climate.org/>) a escala mensual para el periodo de estudio. El conjunto de datos se trató como un cubo de datos espaciotemporal que comprendió un conjunto de 228 ráster en formato GEOTIFF. Los detalles y especificaciones de las variables climáticas descargadas del producto CHELSA se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de las variables climáticas del producto CHELSA Versión 2.1.

Variable	Unidad	Escala	Descripción
HR media mensual (HR)	%	0.01	Humedad relativa promedio mensual cerca de la superficie [70]
VV media mensual cerca de la superficie	m s ⁻¹	0.01	Velocidad media mensual del viento cerca de la superficie durante un año. Cerca de la superficie representa 10 m sobre el suelo [69].
TMed. mensual	°C	0.01	Tomados a partir de datos horarios de ERA5 a 2 metros de altura del suelo [69].
TMáx. mensual	°C	0.01	Tomados a partir de datos horarios de ERA5 a 2 metros de altura del suelo [69].
TMín. mensual	°C	0.01	Tomados a partir de datos horarios de ERA5 a 2 metros de altura del suelo [69].

2.2.3 Albedo y NDVI

Para complementar la información climática se incluyeron dos variables como lo son i) el albedo y ii) NDVI por la relación tan estrecha que tienen estas con el clima [68,71,72]. El albedo es la cantidad de radiación solar devuelta a la atmósfera por parte de la superficie terrestre. Cuando existe un efecto refrigerante, la luz es reflejada a la atmósfera y corresponde a las superficies con colores claros; mientras que al producirse un efecto de calentamiento, la luz es absorbida en la superficie, lo cual se atribuye generalmente a los colores oscuros [73]. El valor del albedo es adimensional y se mide en una escala de cero a uno. El cero corresponde a un cuerpo negro que absorbe toda la radiación incidente y el valor de uno corresponde a un cuerpo blanco que refleja toda la radiación incidente. Las superficies claras tienen valores de albedo superiores a las oscuras, y las brillantes más que las mates. Un albedo alto enfría la superficie, porque la luz radiación absorbida y aprovechada para calentarlo es mínima. Por el contrario, un albedo bajo calienta la superficie, porque la mayor parte de la luz es absorbida por el mismo [74]. La mayoría de las áreas de la tierra se encuentran en un rango del albedo de 0.1 a 0.4, y el albedo promedio de la Tierra es aproximadamente 0.3 [75].

En las superficies terrestres, el albedo en un ángulo cenital solar determinado θ_i puede ser aproximado por la adición proporcional de dos términos: la reflectancia direccional-hemisférica en ese ángulo cenital solar $\bar{\alpha}(\theta_i)$, y la reflectancia bi-hemisférica $\bar{\alpha}$, siendo $D - 1$ la proporción de radiación directa de un ángulo solar dado, y D la proporción de iluminación difusa. Por lo tanto, el albedo real α , también denominado albedo de cielo azul se define como:

$$\alpha = (1 - D) \bar{\alpha}(\theta) + D \bar{\alpha}$$

La reflectancia direccional-hemisférica hace referencia al albedo de cielo-negro (*Black Sky Albedo* - BSA) y la reflectancia bi-hemisférica se refiere al albedo cielo-blanco (*White Sky Albedo* - WSA). A partir de ambos términos es posible calcular el albedo para cualquier condición de iluminación dada con base en el conocimiento de las propiedades intrínsecas de la superficie. BSA y WSA marcan los casos extremos de iluminación completamente directa y difusa, respectivamente.

En el presente estudio se utilizó el BSA dentro del cual se identifica las bandas del i) infrarrojo cercano (Near Infrared - NIR) y ii) del visible (VIS). La primera se encuentra entre la región visible y la región infrarroja del espectro y provee información sobre la salud de la vegetación. Su rango de longitudes de onda está entre 750nm y 2,500nm. La segunda banda está asociada a coberturas contrastantes y equivalentes a la visión en RGB (Red, Green, Blue). Los datos de albedo se obtuvieron de la página oficial de productos satelitales *Global Land Surface Satellite* (GLASS) (<http://www.glass.umd.edu/>). Estos productos se identifican con el código GLASS02A06, se encuentran en formato HDF, con una resolución espacial de 1 km, y no tiene un sistema de referencia definido. Se seleccionaron los datos mensuales correspondientes al periodo de estudio 2000 – 2018.

Por otra parte, el NDVI es una transformación de banda simple que consiste en la diferencia de la radiación del NIR y la radiación roja dividida por radiación del NIR más la radiación roja [76]. A través de este índice es posible identificar las variaciones de la vegetación, e indirectamente indica la intensidad de la actividad fotosintética y la densidad espacial, en las imágenes de satélite que disponen de las bandas roja y NIR. A este índice de vegetación se le considera el más común dentro de los índices para el monitoreo del estado de la vegetación [77]. El rango de valores posibles del NDVI es de -1.0 a +1.0; los valores negativos se asocian a superficies claras como la nieve, rocas, agua, nubes y estructuras artificiales. Los valores cercanos a 0.0 indican suelos desnudos y/o desprovistos de vegetación. Los valores positivos indican presencia de vegetación; mientras más cercanos son a 1.0 indican más vigorosidad en la vegetación y la cubierta vegetal. Los datos mensuales del NDVI fueron tomados del producto MODIS Terra MOD13A3.061 (<https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/modis>) y descargados mediante la plataforma APPEears (<https://appeears.earthdatacloud.nasa.gov/>) para el periodo 2000 – 2018. La resolución espacial del producto es de 1 km y se encuentra el sistema de coordenadas WGS 84 zona 17S.

2.3 Procesamiento de datos

2.3.1 Localización de parches de urbanización y expansión agrícola

Para la selección de las zonas de interés, se utilizó el sistema de información geográfica QGIS [78] para extraer la información de CUS de la región biogeográfica Amazónica para los años 2000 y 2018. El presente estudio está enfocado en evaluar estrictamente dos procesos: i) urbanización y ii) expansión agrícola. Se extrajeron las transiciones a partir de una operación espacial de cruce de mapas empleando el software TerrSet [79]. En esta se garantiza que en el año inicial y final los usos y/o cobertura del suelo eran distintos. De todas las transiciones existentes posibles entre las seis categorías de los mapas de CUS, sólo se consideraron las siguientes transiciones para expansión urbana: forestal a urbano, agricultura a urbano, vegetación arbustiva y herbácea a urbano. Para expansión agrícola se consideraron las siguientes transiciones: agricultura a vegetación arbustiva y herbácea, y vegetación arbustiva y herbácea a agricultura. Las demás posibles transiciones y transiciones sospechosas, al representar una mínima cantidad del área (< 1%) fueron descartadas.

A partir de las transiciones identificadas tanto para la urbanización como para la expansión agrícola, se elaboraron dos mapas, el primero de urbanización y el segundo de intensificación y rotación agrícola, ambos con la resolución del mapa original. En cada uno de ellos se localizaron y cuantificaron las zonas afectadas por cada transición entre el año 2000 y 2018. Se seleccionaron únicamente las áreas agregadas mayores a 700 ha (grupos de 7.778 píxeles de 30x30m) en las que no cabe duda de la transición estudiada.

Aunque, pueden existir imprecisiones en algunos de los píxeles debido a la precisión global de los mapas base, en la siguiente sección se expone el método que se empleó para solventar las imprecisiones.

2.3.2 Armonización geométrica de los parches y las variables climáticas

La armonización geométrica es un procedimiento que permite relacionar información espacial que se encuentra a diferentes escalas. Este proceso consiste en sobreponer los parches, identificados como urbanización y expansión agrícola, con la grilla vectorial derivada de cada una de las variables climáticas según su fuente de datos y resolución espacial. Para tal fin, se empleó el método del área máxima que indica que: solo una entidad que se superpone a cada celda debe superponerse al menos un 50% para ser seleccionada [80]. En el presente estudio se incrementó este porcentaje al 70%, para aumentar la representatividad de los parches correspondientes a cada transición dentro de las celdas de la grilla vectorial. A continuación, se detalla la información y secuencia metodológica de la armonización geométrica.

Datos de entrada: Son los parches de cada transición en formato vectorial y un archivo de referencia en formato ráster de cada una de las variables climáticas. La extensión de los archivos ráster es a nivel mundial.

Proyección: Se verificó que los datos de entrada se encuentren en el sistema de coordenadas WGS 84 UTM Zona 17S (EPSG: 32717). Cuando los datos de entrada no tenían asignado un sistema de coordenadas, se proyectaron al sistema mencionado, y en el caso de tener asignado un sistema diferente, se realizó una reproyección. Para esto se utilizó el software QGIS.

Extracción de información climática para el área de estudio: Se utilizó el límite de la región biogeográfica Amazónica del Ecuador en formato vectorial para extraer la extensión del ráster de referencia de cada una de las variables climáticas, albedo y NDVI. Para este fin se empleó la herramienta cortar del software QGIS.

Grilla vectorial de las variables climáticas: Utilizando el archivo ráster de la variable climática obtenida en el punto anterior se procede a convertir esta en polígonos con la herramienta poligonizar del software QGIS. Esto se realizó para obtener una grilla (conjunto de celdas) en formato vectorial que representa cada uno de los píxeles de la variable climática. Utilizando esta capa, se procedió a calcular el área o superficie de cada celda, que es aproximadamente el mismo valor para todas las celdas; aunque en algunos casos se encuentran variaciones que se atribuyen a la reproyección realizada. El resultado de procedimiento se utiliza como máscara para las operaciones detalladas a continuación.

Identificación de polígonos de las transiciones (urbanización y expansión agrícola) que se superponen con las variables climáticas: Utilizado como máscara la grilla vectorial del paso anterior, se seleccionaron aquellas celdas de las variables climáticas que intersecaron con una coincidencia global del 70% (lo cual equivale a tomar los polígonos que tengan parches con un área superior a 809.012 m²) con los parches de cada transición de interés. Se obtuvo una nueva grilla vectorial por cada variable climática, albedo y NDVI, de ambas transiciones que se solaparon con los parches de urbanización y expansión agrícola.

De esa forma se sobrepone la información satelital de las variables climáticas, albedo y NDVI, con la capa vectorial de CUS de cada transición para acoplarla e identificar las áreas que coinciden y se superponen en una misma ubicación geográfica, a este resultado se le denomina polígono armonizado bruto. Posteriormente, estas áreas por variable climática deben ser comparadas a fin de encontrar los puntos geográficos coincidentes. Este procedimiento se detalla en la siguiente sección.

2.3.3 Selección de centroides coincidentes

A partir de la capa de polígonos armonizados brutos, se procede con la extracción de los centroides de estos polígonos empleando el método de forzado geométrico interno. Posteriormente se superpusieron los centroides seleccionados por cada producto (de las variables climáticas, albedo y NDVI) para agrupar aquellos que tienen información climática coincidente dentro de un área próxima común. La cantidad de centroides están en función del producto satelital utilizado y de la transición de CUS con la cual se realizó la superposición. Esto se debe a que las grillas vectoriales de los productos de cada variable son distintas por la resolución espacial de cada variable climática. Este procedimiento se realizó para cada una de las variables climáticas, albedo y NDVI.

Una vez se cuenta con los centroides del polígono armonizado, éste actuó como el punto de selección dentro de una localización próxima común. El radio de selección del centroide próximo común se determinó empleando la selección por ubicación dentro de una proximidad. Esta fue definida como la mitad más un metro de la diagonal principal de un píxel de 1 km², ya que ésta es la resolución máxima de la información climática, albedo y NDVI, esta distancia fue de 708.1 m. Una vez seleccionados los conjuntos de puntos, se estableció el centro geométrico del conjunto de centroides para cada centroide del polígono armonizado seleccionado. Este centro geométrico del conjunto de centroides fue empleado como punto de referencia de la extracción final del cubo de datos de cada una de las variables climáticas, albedo y NDVI. Para lograrlo se utilizó la herramienta crear centroides de la caja de herramientas del *software* QGIS. Todo el proceso se lleva a cabo para cada una de transiciones (i) urbanización y (ii) expansión agrícola, para fusionar los productos CHELSA, MODIS, y GLASS. Finalmente se cuenta con un total de dos capas vectoriales con los puntos de perforación (centroides seleccionados) de los cubos espacio temporales.

2.3.4 Extracción de series temporales de variables climáticas, albedo y NDVI

Para la extracción de las series temporales de las variables climáticas, albedo y NDVI, se utilizó el complemento “herramientas de muestreo puntual” del *software* QGIS. A través de este complemento es posible extraer valores ráster de múltiples capas con base en los atributos de un archivo vectorial. Para este estudio, empleando la extracción de centroides fusionados entre las capas de los procesos de (i) urbanización y (ii) expansión agrícola, y las grillas de las variables climáticas y asociadas, se procedió a perforar los cubos de datos. En las series se garantiza que una porción de la serie presenta datos, previo al CUS y posterior al CUS, a pesar de que el CUS suceda en tiempos distintos dentro del periodo 2000 –

2018. El archivo de salida es una capa nueva de puntos con las coordenadas del muestreo (centroides fusionados) y con los atributos o el contenido tomado de las celdas o píxeles del o los archivos ráster (*Sampling Points QGIS*). A continuación, se detalla el procedimiento de extracción de las series temporales:

Datos de entrada: Se empleó la capa vectorial de los puntos de cada transición de cambio de uso de suelo, y el cubo de datos de los archivos ráster mensuales de cada una de las variables climáticas en el periodo 2000 – 2018.

Reproyección: Para realizar el proceso de extracción de las series temporales de cada ráster se re proyectaron todos los archivos de entrada al sistema de coordenadas WGS84 (EPSG: 4326) con la herramienta reproyectar de QGIS.

Extracción de los puntos del cubo de datos: Utilizando la “herramienta de muestreo puntual” se ingresó la capa de puntos que hacen el papel de coordenadas de referencia para la extracción de los valores de los archivos ráster de cada mes y de cada variable. El archivo de salida se obtiene en formato CSV (*Comma Separated Values*). Este archivo contiene las series temporales de las variables climáticas, albedo y NDVI por cada transición.

2.3.5 Tratamiento de las series temporales

2.3.5.1 Segmentación geográfica por latitud y longitud

En primer lugar, es indispensable conocer el comportamiento de las variables por zonas que compartan criterios topográficos, bioclimáticos y regionales, ya que estos elementos permiten relacionar cualquier tipo de variabilidad en las condiciones climáticas locales con el cambio de CUS. En segundo lugar, la división geográfica de territorio en zonas específicas facilita la comprensión de la variabilidad climática. Así pues, basados en la topografía se identifica la altitud como elemento diferencial que en el área de estudio varía desde los 6,263.47 m.s.n.m., albergando el Chimborazo que es el punto más alto del país, hasta los 180 m.s.n.m. donde se encuentra el bioma Amazónico, en la parte más Este del Ecuador. Por lo tanto, el gradiente topográfico hacia la Amazonía es diverso alimentando una gran red de drenaje que nace desde las zonas más altas de la región biogeográfica Amazónica donde se encuentran los volcanes y cerros hasta las planicies de inundación en el Oeste Amazónico del Perú.

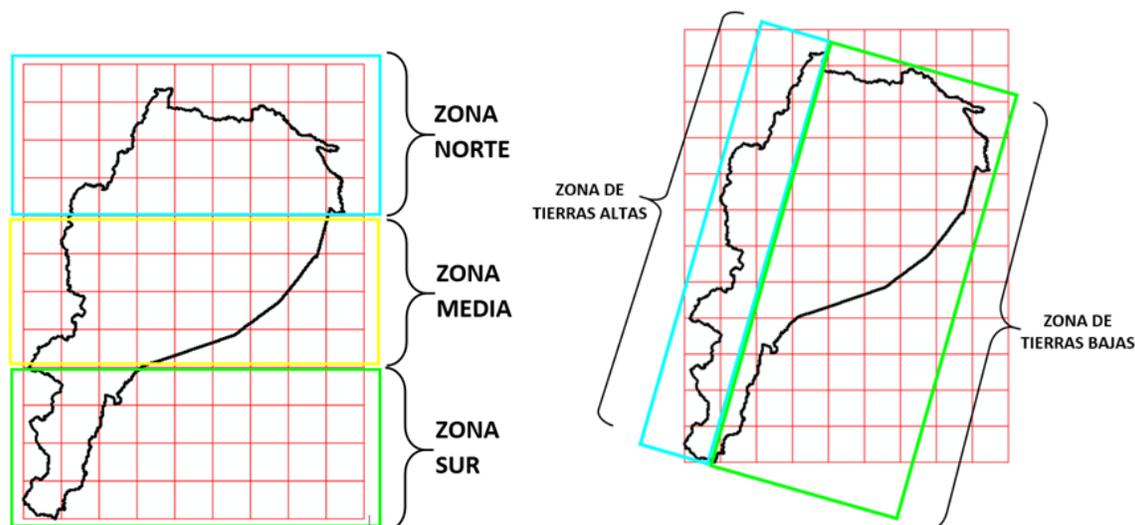


Figura 2. Zonificación de la región biogeográfica amazónica del Ecuador. Al lado izquierdo se encuentra la segmentación por latitud y al lado izquierdo la segmentación por longitud.

La extensión geográfica del país se encuentra entre las latitudes 2° al Norte hasta 5° al Sur y la longitud desde 75° hasta 91° Oeste. Considerando esto, se realizó una segmentación para el análisis territorial, que consistió en: una grilla de 0°35'0" en sentido Norte a Sur con un total de 12 cuadrículas, la cual a su vez se segmentó en tres zonas equidistantes, cada una compuesta de 4 cuadrículas, denominadas zona norte, zona media, y zona sur, Figura 2 izquierda. Para la segmentación por longitud, se empleó una división de 0°40'0" para un total de 9 cuadrículas en división horizontal. Además, en la longitud se consideró la topografía y se dividió en zona de tierras bajas aquellas menores a 2,000 m.s.n.m., y zona de tierras altas las mayores a esa altitud, entendiendo que esta división no es uniforme o equidistante debido a que la mayor parte del área pertenece a la Amazonia baja, Figura 2 derecha. La cuadrícula total de la Amazonía ecuatoriana se divide en 108 cuadrículas (12x9) de las cuales efectivas resultan ser 60. Para una representación gráfica las cuadrículas se emplazarán por zonas en función del diagrama de la Figura 2.

Considerando tanto la segmentación por latitud como por longitud se obtuvo un total de 6 zonas identificadas en la Amazonía ecuatoriana como: zona alta norte, zona alta media, zona alta sur; zona baja norte, zona baja media y zona baja sur, Figura 3.

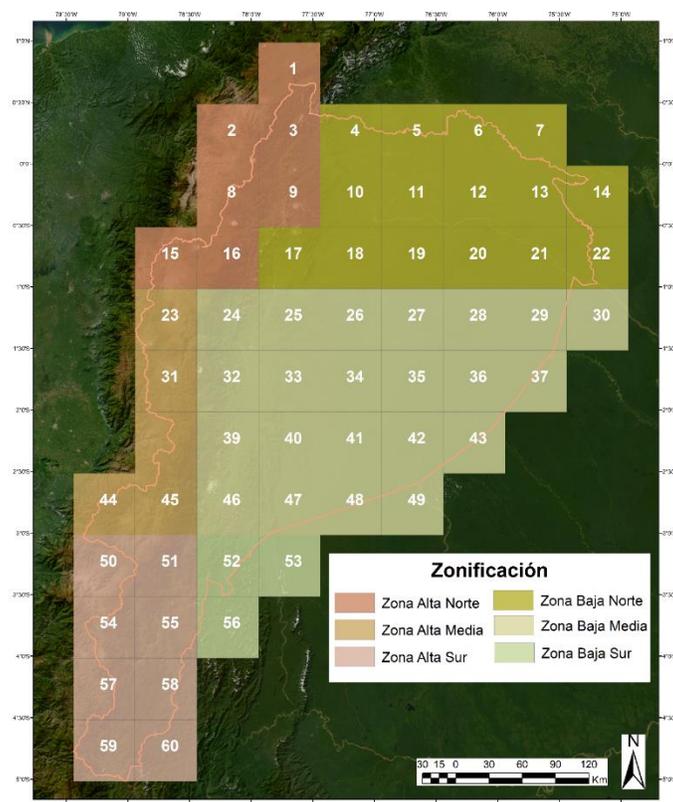


Figura 3. Cuadrículas de zonificación de zonas altas y zonas bajas para los procesos de urbanización y expansión agrícola.

A continuación, se describe la correspondencia entre la numeración de las cuadrículas y la zonificación de la Figura 3.

- Zona alta Norte: cuadrantes N° (1,2,3,8,9,15, y 16)
- Zona alta Media: cuadrantes N° (23,31,39,44, y 45)
- Zona alta Sur: cuadrantes N° (50,51,54,55,57,58,59, y 60)
- Zona baja Norte: cuadrantes N° (4,5,6,7,10,11,12,13,14,17,18,19,20,21, y 22)
- Zona baja Media: cuadrantes N° (24,25,26,27,28,29,30,32,33,34,35,36,37,39,40,41,42,43,46,47,48, y 49)
- Zona baja Sur: cuadrantes N° (52,53, y 56)

2.3.5.2 Suavizado de las series temporales y cálculo del z-score para la evaluación de las anomalías

Las series fueron preprocesadas utilizando el método de Savitzky-Golay, más conocido como filtro S-G el cual permitió suavizar el ruido de las series temporales. Esta es una metodología sencilla, pero al mismo tiempo robusta que ayuda a reducir la contaminación por variabilidad atmosférica y nubosidad [81]. Si bien el filtro suaviza los eventos picos, el objetivo del presente estudio no se basa en el conteo de eventos extremos, ya que el efecto en el cambio de CUS corresponde con un proceso continuo y de duración prolongada contrario a eventos puntuales o de cierta duración como pueden ser los eventos climáticos

locales o regionales. Para el caso específico de estudio se utilizó el método a partir de un ajuste polinómico a $2n + 1$. El ajuste polinómico de segundo orden usando 7 puntos de datos está definido por la siguiente ecuación:

$$Y_t = \frac{(-2x_{t-3} + 3x_{t-2} + 6x_{t-1} + 7x_t + 6x_{t+1} + 3x_{t+2} - 2x_{t+3})}{21}$$

Donde:

x : Cada observación del conjunto de variables climáticas, albedo, y NDVI.

$t \pm n$: Es el valor de cada observación del conjunto de variables climáticas, albedo y NDVI de la base de datos en un tiempo n (3^{ra}, 2^{da} y 1^{ra} posición hacia adelante (+) como hacia atrás (-)).

Utilizando los datos suavizados se realizó un proceso de estandarización de datos con el uso del *z-score*. Este parámetro describe el número de desviaciones estándar a la que se encuentra un valor medido de la media. Cuando el valor del *z-score* está por encima de la media los valores *z-score* son positivos y cuando son menores a la media estos valores son negativos. Esta distancia, en términos de desviaciones estándares, entre cada observación del conjunto de variables consideradas en este estudio, se denominó anomalía [82]. En el presente trabajo no se consideró la distribución de los datos debido a que no se pretende realizar una retrospectiva o prospección de ningún efecto adyacente. Las anomalías positivas y negativas denotan si los valores de las variables climáticas, albedo, y NDVI están por encima o por debajo del promedio de cada variable, respectivamente. El valor absoluto de la anomalía de las variables estudiadas indica cuántas desviaciones estándar se aparta el valor promedio de cada variable [83]. Los valores muy altos y bajos de *z-score* indican anomalías raras. El *z-score* se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$z = \frac{x_i - \bar{x}}{s}$$

Donde:

z : *z-score* o puntuación z .

x_i : valor de las observaciones de la base de datos.

\bar{x} : Media de la base de datos.

s : Desviación estándar de la base de datos.

El cálculo del *z-score* se realizó para cada variable climática, albedo y NDVI en cada conjunto de centroides seleccionados para cada proceso (urbanización y expansión agrícola). El cálculo se realizó para: (i) las seis zonas que consideran la relación biogeográfica por longitud (tierras bajas y tierras altas), y latitud (zonas norte, media y sur) denominadas como: zona alta norte, zona alta media, zona alta sur, zona baja norte,

zona baja media y zona baja sur, y (ii) para cada centroide considerando únicamente la segmentación por latitud. La aplicación de la estandarización permite identificar los intervalos en los que las anomalías con respecto a la serie son significativas en términos de cambio persistente o progresivo. Es decir, aquellos valores de *z-score* que se encuentran en el intervalo $[-1,1]$ son catalogados como anomalía no inusual, $[-2, -1]$ y $[2, 1]$ son catalogados como anomalías raras; mientras que aquellos valores que exceden ± 2 se consideran como anomalías muy raras [82,83].

La inclusión de la variabilidad geográfica permitió que el análisis de la dinámica de zonas sea más concreto. Los valores de *z-score* suavizados con el S-G fueron utilizados en la construcción de los mapas de calor y los valores de *z-score* sin suavizar se utilizaron en los gráficos de violín y diagramas de cajas y bigotes, ambos diagramas como parte de la representación gráfica y análisis estadístico de la metodología *Local Climate Variability and Land Use and Land Cover Change* (LCV-LULCC) que se desarrolla en la siguiente sección.

2.4 Metodología LCV-LULCC

La metodología LCV-LULCC consiste en integrar y relacionar los apartados descritos en la sección 2.3 que vinculan espacial y temporalmente los cambios de CUS con las variables climáticas estudiadas. A través de esta metodología se establece una relación biogeográfica de los procesos (urbanización y expansión agrícola) con las variables según la segmentación por latitud y longitud, lo cual permite inferir posibles respuestas climáticas a escala local. A través del uso de diagramas y gráficos estadísticos es posible analizar el comportamiento y distribución de las variables por cada proceso y zona. A continuación, se detalla el procedimiento.

2.4.1 Relación biogeográfica y climática local

Las variables climáticas, albedo, y NDVI son dinámicas en el tiempo y en el espacio. Estas se encuentran afectadas por factores como: la ubicación geográfica, los rangos altitudinales, la presencia/ausencia de actividades antrópicas, los procesos geológicos, etc. Algunos de estos (o todos) al interactuar simultáneamente con procesos territoriales y/o atmosféricos desencadenan eventos locales que afectan el ambiente y al ser humano. Por ejemplo, un deslizamiento de tierra tras una deforestación a causa de precipitaciones altas y/o persistentes en zonas de alta pendiente.

A pesar de la complejidad que les circunda, los efectos locales deben diferenciarse de los efectos puntuales. Con base en lo expuesto en el ejemplo anterior, no todas las zonas deforestadas presentan deslizamientos de tierra, para que esto suceda, se requiere además de la ocurrencia de altas

precipitaciones factores puntuales que desencadenen eventos como lo es un deslizamiento. Es decir, resulta ser una combinación de factores que desencadenen el proceso puntual. Así pues, es necesario conocer si algún factor como el gradiente altitudinal tiene algún efecto en la variabilidad puntual. En este estudio se consideran los gradientes, altitudinal, latitudinal, y longitudinal en las estribaciones del Este de la Amazonía Ecuatoriana para diferenciar el efecto local del puntual. Considerando que el efecto global en el clima incide de forma local, a continuación, se argumenta la selección de las variables empleadas en relación con los procesos de urbanización y expansión agrícola.

En general, a medida que aumentan los gases de efecto invernadero a escala global se produce un aumento generalizado de la temperatura del planeta, afectando a todas las escalas espaciales de la tropósfera. No solamente se ven afectadas las temperaturas; sino también el movimiento del aire en la atmósfera debido a sus relaciones termodinámicas que vinculan la energía y la masa. Es así que la velocidad del viento, como variable de mayor percepción humana, se ve afectada con el cambio de la temperatura. Así mismo, los cambios superficiales de la corteza continental influyen en el comportamiento de la velocidad del viento. Por ejemplo, en zonas boscosas con doseles diferenciales se ralentizan las rachas de viento, a diferencia de zonas desprovistas de vegetación que tienen una velocidad del viento mayor debido a la poca resistencia o rugosidad superficial.

Otra variable relacionada con los procesos estudiados es la humedad relativa, que presenta alta sensibilidad a la presencia/ausencia de vegetación por la transpiración que realizan las plantas. La humedad relativa presenta valores muy altos cuando el suelo está cubierto por infraestructura que no facilita la absorción, almacenamiento, y regulación del clima en presencia de precipitación. La evaporación en estas zonas es cuantiosa tras las precipitaciones y su valor es alto de forma cuasi-instantánea durante el día de lluvia. Si bien a escala diaria no es posible cuantificar el efecto instantáneo, el valor medio diario de la humedad relativa en el trópico es reflejo de la variabilidad sub-diaria, ya que se cuenta con aproximadamente 12 horas de luz por día y su variabilidad anual, con frecuencia, es muy reducida.

La relación entre el gradiente altitudinal y la distribución de la temperatura en el trópico es relevante, a medida que sube la altitud disminuye la temperatura y la humedad relativa. Es decir, en los cuadrantes de zonas bajas se presume encontrar temperaturas mayores y altos porcentajes de humedad relativa, mientras que, en los cuadrantes de zonas altas dadas las bajas temperaturas, se presenta una disminución progresiva de la transpiración hasta cotas elevadas en la cordillera Andina.

Para el caso del albedo, este guarda relación directa con la CUS. En el Albedo, es de esperar que las coberturas más oscuras reflejen menor radiación que aquellas más claras. En efecto las zonas urbanas en el trópico suelen albergar ingentes cantidades de materiales hormigonados y techos de fibrocemento que reflejan en consecuencia más que la vegetación. Por otro lado, el albedo en la expansión agrícola sería alternante, incluso se incrementa cuando el suelo se expone directamente o se muestra al satélite desprovisto de vegetación. Especialmente los suelos con grandes cantidades de materia orgánica, típicos de la zona Andina, presentan bajos valores de albedo debido a la absorbancia del material. Los suelos de la Amazonía al mostrarse desprovistos de vegetación son resultado de altos procesos de lavados de sales y meteorización con niveles medios de albedo característicos de suelos rojizos, típicos de suelos con altos contenido de hierro y aluminio.

El NDVI, en relación con el CUS, aumenta a medida que existe mayor cobertura y actividad fotosintética en la superficie terrestre siempre que existan condiciones edafológicas favorables para la vegetación (disponibilidad de agua y nutrientes). Cabe mencionar que los ecosistemas predominantes de la zona baja son bosques tropicales y bosques húmedos de gran altura; a medida que aumenta la cota topográfica hacia la cordillera Andina, la vegetación va perdiendo tamaño para adaptarse a las condiciones climáticas. Por ello en las zonas superiores a los 3,500 m.s.n.m. se encuentran ecosistemas de herbazales con actividad fotosintética con valores de NDVI bajos, lo cual no significa que exista una pérdida de vegetación y/o erosión de la zona. En función de la latitud se muestra una relación y comportamientos similares en las viables tomando en cuenta las tres zonas (norte, centro y sur) con un ancho aproximado de 2° de latitud cada una.

En el presente estudio, se ha seleccionado el albedo VIS por su capacidad de detección de superficies claras asociadas a zonas urbanas y el albedo NIR por su relación con la actividad fotosintética. A pesar de la relación mencionada, este parámetro fluctúa en función de condiciones superficiales como el color, la humedad y la rugosidad de la superficie, la presencia de nubes y la fenología o épocas de floración de la vegetación. Así pues, es posible relacionar el albedo con el NDVI y los procesos de urbanización y expansión agrícola. El albedo de zonas urbanas debe ser bajo al igual que el NDVI, mientras que el albedo en zonas de rotación agropecuaria deber ser medio a alto y el NDVI igualmente.

Aunque todas las relaciones entre variables mencionadas anteriormente se encuentran afectadas por el cambio de CUS, es conveniente conocer la influencia que tiene el vecindario a lo largo del tiempo. Por esta razón, se incorpora en el análisis por cuadrículas de la Figura 2. Intentando palear, el efecto de vecindario en el análisis de la variabilidad climática local dado el cambio de CUS.

2.4.2 Respuesta climática esperada a partir de las transiciones de CUS

La respuesta climática esperada a partir de los procesos de urbanización y expansión agrícola se pueden clasificar en dos tipos, i) respuestas de evidencia directa o instantánea y ii) respuestas paulatinas hacia el futuro. Para poder conocer el comportamiento y la tendencia de las variables en función de la CUS, es necesario partir esquema de variación referencial de la percepción técnica de los efectos adyacentes, Tabla 2. Es decir, hipotetizar la influencia de la variación en una variable con respecto a las demás, si estas se mantienen, incrementan o disminuyen; no necesariamente se requiere cuantificar los efectos tan solo su dirección de cambio. Así será posible comparar la dirección de la percepción (flecha) con el cambio detectado y su magnitud una vez este sea calculado, a esto se le denomina contraste cuantitativo. El contraste cuantitativo de la percepción (flecha vs magnitud calculada) es un elemento que permite a los actores involucrados tener conciencia de los efectos que pueden desencadenar cambios en distintas dimensiones y escalas. La percepción nos permite tener una noción o referencia del cambio en relación con los posibles cambios en el clima en un horizonte próximo y si este espacialmente pudiese desencadenar, aparte de los efectos locales, efectos regionales.

Para establecer las direcciones de cambio en las variables, se recomienda construir una tabla de con tres entradas. Estas son: i) los cambios de CUS (urbanización y la expansión agrícola), ii) las zonas biogeográficas de referencia (zona de tierras altas y zonas de tierras bajas, Figura 2), y iii) las variables climáticas y/o asociadas en estudio, Tabla 1. En la tabla de tres entradas deben describirse las posibles relaciones de incremento, persistencia, o disminución, normalmente es posible realizarlo con flechas para mejorar su comprensión de forma intuitiva.

Para analizar la respuesta climática esperada a partir de las transiciones de CUS, se construyó la Tabla 2, que relaciona cada una de las variables estudiadas con los procesos de urbanización y expansión agrícola dada la zonificación de la Figura 2 derecha. En cada una de las celdas, se colocó una flecha que indica la percepción que tiene el autor sobre el comportamiento de cada variable. La flecha hacia arriba indica aumento, la flecha hacia abajo disminución, y la flecha horizontal hacia la derecha indica que la variable no presenta cambios, Tabla 2. La percepción del autor está sujeta al conocimiento previo de cada variable, de los procesos, y de cada zona; sin embargo, esto debe ser cotejado con otros estudios e información similares que se encuentren disponibles.

Tabla 2. Percepción de la respuesta climática esperada a los procesos de urbanización y expansión agrícola según segmentación por longitud.

Variables	Urbanización		Expansión Agrícola	
	Zonas bajas	Zonas altas	Zonas bajas	Zonas altas
HR	↑	↑	↓	↓
VV	→	↓	↑	↑
TMáx.	↑	↑	↑	↑
TMed.	↑	↑	↑	↑
TMín.	↓	↓	↓	↓
NDVI	↓	↓	↑	↑
Albedo NIR	↓	↓	↑	↑
Albedo VIS	↑	↑	↑	↑

2.4.3 Representación gráfica del comportamiento y estadísticos de las variables climáticas, albedo y NDVI

La representación del comportamiento de las variables climáticas, del albedo a través de las bandas NIR y VIS, y del NDVI se realizó mediante mapas de calor. En el eje x de cada mapa de calor se representa la variable tiempo incluyendo los 12 meses del año entre 2000 y 2018 y en cada celda del eje y, el valor del *z-score* calculado en la sección 2.3.5.2. La representación se realizó por cada proceso (urbanización y expansión agrícola). La gráfica se encuentra dividida por zonas norte, media y sur mediante líneas negras gruesas. Las rampas de tres colores de cada mapa de calor representan las graduaciones de las anomalías de cada variable. Un primer color indica las anomalías más positivas o muy raras, un segundo color indicando las anomalías raras, un color neutro indica el cero o anomalías no inusuales. El gráfico al contener todos los meses entre 2000 y 2018 permite identificar la variación estacional (época seca y época lluviosa) y épocas de cosecha y siembra.

Para la representación de la distribución de los datos de las series temporales para las variables climáticas, albedo y NDVI, se emplearon gráficos de violines y diagramas de cajas y bigotes. De este modo, las figuras resultantes corresponden a violines verticales con una representación doble, en el costado izquierdo se representa la mitad de un gráfico de violín indicando la distribución y en el costado derecho un diagrama de cajas y bigotes. Estos gráficos fueron empleados para representar las diferencias entre las 6 zonas definidas en la sección 2.3.5.1 para cada proceso (urbanización y expansión agrícola). La variación de las métricas de los gráficos de cajas y bigotes permite identificar la intensidad del cambio en la anomalía por

cada zona. Un incremento en los *z-score* (anomalías) positivos o negativos daría cuenta de la intensidad de los cambios en las variables.

Se realizó una evaluación de los estadísticos de las series temporales. Por cada zona se calcularon las medidas de tendencia central, para efectos de reporte de los hallazgos solo se describirá la mediana. Considerando la naturaleza de los datos de entrada y el objetivo del análisis, la mediana es la medida más adecuada cuando existen valores atípicos que indican una distribución con sesgo. Otra de las ventajas de usar la mediana es que, a diferencia de la media, esta no se está afectada por los valores atípicos. También se reportan los valores de los percentiles 5 y 95. Por debajo del primero se encuentran el 5% de datos, y por debajo del segundo se encuentran el 95% de los datos, respectivamente. Finalmente se reportan los cuartiles Q1, Q2, y Q3, los cuales sirvieron como insumos para la construcción de los diagramas de cajas y bigotes. El análisis estadístico se realizó empleando RStudio. A continuación, se detalla la secuencia de los cálculos:

- Cargar las bases de datos. Para la construcción de los mapas de calor estos fueron suavizados y estandarizados mediante *z-score*; mientras que para la elaboración de los gráficos de violín y diagramas de cajas y bigotes únicamente se calculó únicamente el *z-score*.
- Para la elaboración de los mapas de calor se utilizó la función *heatmap()*.
- Utilizando *ggplot2* se elaboraron los gráficos de violines y de cajas y bigotes.
- Para el caso de los gráficos de violines se utilizó la función *geom_violinhalf* para representar la mitad de un violín. El gráfico de violín es una variante de un diagrama de caja y bigotes utilizado para visualizar la distribución de los datos y su densidad de probabilidad.
- Para la construcción de los diagramas de cajas y bigotes se utilizó la función *geom_boxplot()*. El diagrama de caja y bigotes es una presentación visual que describe al mismo tiempo información sobre la dispersión, simetría, tres cuartiles (Q1, Q2, Q3), valores mínimo y máximo.

3. Resultados

3.1 Acoplamiento espacial de las transiciones de CUS con las variables climáticas, albedo, y NDVI

Después de cruzar los mapas de CUS del año 2000 y 2018 se obtuvo un conjunto de parches identificados como urbanización y expansión agrícola con áreas totales de 490.28 km² y 1,101.22 km², respectivamente, Tablas 3 y 4. Se identificaron las categorías que más contribuyeron al incremento de zonas urbanizadas,

estas fueron suelo agropecuario y bosque. La expansión agrícola se atribuyó principalmente a la pérdida del área en las categorías bosque y vegetación arbustiva y herbácea.

Tabla 3. Superficie de cobertura que cambio a urbanización (ganancias a partir de otras coberturas) desde el año 2000 al 2018 en la región biogeográfica Amazónica

Categorías	Cambio entre 2000 Y 2018 (km²)	%
Bosque	57.00	+ 11.62
Vegetación arbustiva y herbácea	11.89	+ 2.43
Cuerpo de agua	0.54	+ 0.11
Suelo agropecuario	418.62	+ 85.39
Otros	2.23	+ 0.45
Total	490.28	

Se identificaron un total de 6,636 parches para urbanización y 17,141 parches para expansión agrícola los cuales tienen una variación de superficie amplia. La superficie de los parches de urbanización varió entre 900m² hasta 19,646,100m², y de los parches de expansión agrícola desde 900m² hasta 70,020,900m².

Tabla 4. Superficie de cobertura que cambio a intensificación y rotación agropecuaria (ganancias a partir de otras coberturas) desde el año 2000 al 2018 en la región Biogeográfica Amazónica

Categorías	Cambio entre 2000 Y 2018 (km²)	%
Bosque	2.94	+ 0.27
Vegetación arbustiva y herbácea	673.35	+ 61.14
Cuerpo de agua	0.76	+ 0.07
Suelo agropecuario	424.16	+ 38.51
Otros	0.01	+ 0.09
Total	1,101.22	

Con relación al conjunto de datos de las variables climáticas, albedo y NDVI provenientes de los diferentes productos satelitales, se obtuvo un total de 228 archivos ráster a diferentes escalas espaciales. Por cada producto satelital se identificaron aquellos pixeles que se solaparon en un 70% con los parches identificados como urbanización y expansión agrícola. La cantidad de pixeles por producto y proceso se encuentra reportada en la Tabla 5.

Tras el proceso de armonización de los parches de urbanización y expansión agrícola con los productos satelitales de las variables climáticas, albedo y NDVI, se identificaron un total de 245 puntos o centroides; de los cuales 59 pertenecen al proceso de urbanización y 186 pertenecen al proceso de expansión agrícola, Figura 4.

Tabla 5. Cantidad de píxeles por producto satelital que contienen un 70% de la superficie de los parches identificados como urbanización y expansión agrícola

Productos satelitales	Urbanización	Expansión agrícola
CHELSA	225	579
MODIS	68	262
GLASS	337	944

Utilizando estos puntos seleccionados se extrajeron un total de 1,960 series temporales mensuales entre el periodo 2000 y 2018. Resultan ser 8 series por cada punto, 472 series para urbanización y 1,488 series para expansión agrícola. Estas fueron empleadas posteriormente para el análisis de la relación entre los cambios de CUS y las variables climáticas, albedo y NDVI.

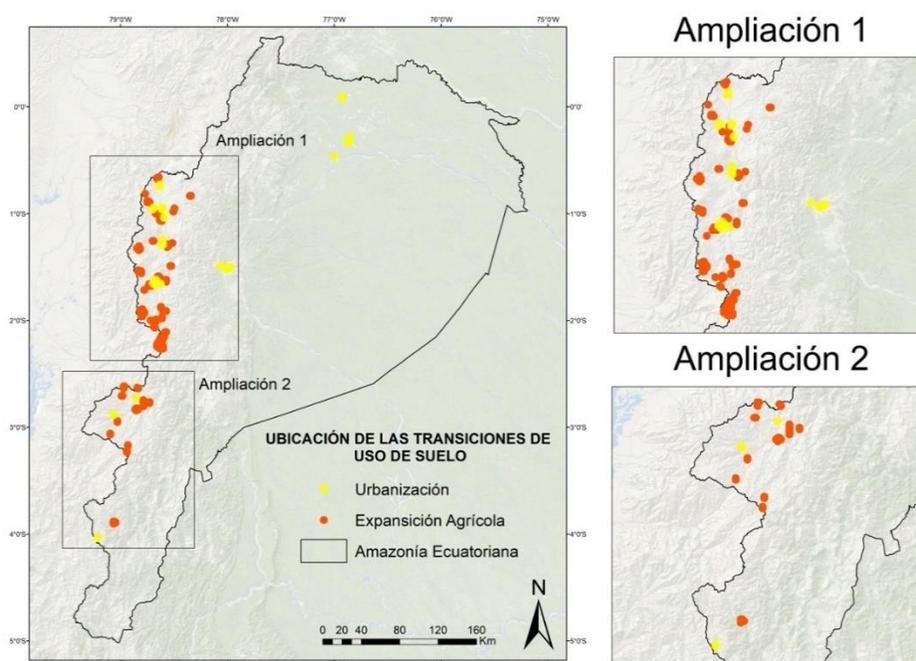


Figura 4. Distribución espacial de los centroides seleccionados para urbanización y expansión agrícola después del proceso de armonización geométrica

3.2 Comportamiento general mensual de las anomalías de las variables climáticas, albedo, y NDVI en los procesos de urbanización y expansión agrícola

La Figura 5 muestra el estado inicial (año 2000, cyan) y final (año 2018, morado) promedio de las variables climáticas, NDVI, y albedo del proceso urbanización y de expansión agrícola. Debido a la variabilidad anual de las variables climáticas se optó por mostrar el z-score del año inicial y el año final para el proceso de urbanización y de expansión agrícola. El valor del z-score entre $[-1,1]$ corresponde a las anomalías no inusuales (región blanca central), es decir las que se esperan obtener con mayor frecuencia; sin embargo, las anomalías $> \pm 1$ se consideran raras o muy raras $> \pm 2$ lo que supone una variación considerable en el

análisis del clima local (región gris). El número de veces anualmente que se ubica el z-score a más de 2 desviaciones estándar positiva o negativa indicaría anomalías estacionales pronunciadas y/o afectadas por el cambio de CUS.



Figura 5. Evolución de las variables climáticas, albedo, y NDVI para los años 2000 y 2018 de los procesos de urbanización (izquierda) y expansión agrícola (derecha) agregados mensualmente.

La humedad relativa (HR) en los dos procesos no presentan variaciones considerables en las anomalías y pocos valores superan los z-scores ± 1 . Sin embargo, en el periodo septiembre-enero es donde se encuentran mayores diferencias en las anomalías. La velocidad del viento (VV) en el proceso de urbanización presenta variaciones considerables de las anomalías, incluso en el mes de agosto comparando el año 2000 y 2018 estos presentan anomalías completamente dispares a pesar de que en el mes de Julio representaban puntos similares. La velocidad del viento (VV) en el proceso de expansión agrícola no presenta anomalías considerables. Es importante destacar la relación inversa de las anomalías entre la humedad relativa y la velocidad del viento, especialmente entre septiembre y noviembre.

Las anomalías en la TMed. se destacan por su alternancia y diferencia en el segundo semestre del año natural, es decir se acentúan los valores extremos por encima de los z-scores ± 1 . Especialmente, las temperaturas medias comparando el año 2000 y 2018 presentan anomalías extremas y opuestas, por ejemplo, en el proceso de urbanización en el mes de julio y en el proceso de expansión agrícola en febrero, marzo, mayo, junio, y septiembre. La frecuencia de anomalías extremas y opuestas en la temperatura promedio ha aumentado especialmente en el proceso de expansión agrícola. En la TMáx., las anomalías son tendencialmente estables en el proceso de urbanización, agudizando las anomalías cada vez más

extremas en el mes de septiembre. Misma situación reportada en 2018 para la temperatura máxima del proceso de expansión agrícola con el agravante que en el año 2000 no eran considerables las anomalías. La dinámica de las anomalías para la $T_{Mín.}$ en el proceso de urbanización se acentúan los valores extremos tanto en mínimos como máximos. Caso especial es el de la temperatura mínima en el proceso de expansión agrícola en el que las anomalías son opuestas e inversas para el primer semestre, efecto que marca la tendencia en la temperatura promedio en el mismo primer semestre del año.

El valor del índice de vegetación NDVI en la zona urbana presenta una variación destacable entre el año 2000 y 2018 de relevancia en las ventanas temporales enero-marzo y julio-octubre en el que las anomalías son divergentes, amplias, y opuestas. En el proceso de expansión agrícola, las anomalías del NDVI en el segundo semestre eran casi nulas, destacando en 2018 una variación negativa de las mismas. Para el periodo febrero-marzo las anomalías fueron amplias ($> +1$ desviaciones estándar) acentuando una anomalía superior en para 2018, pero con la misma tendencia temporal.

Las anomalías de albedo NIR en el proceso de urbanización presenta variaciones entre el 2000 y 2018 en los meses de marzo, abril y octubre. Para el caso del proceso de expansión agrícola la ventana temporal abril-junio muestra una anomalía negativa para 2018 de relevancia asociada con las fechas de cosecha de cultivos anuales. En la ventana diciembre-febrero, la tendencia anómala opuesta resulta evidente mostrando el año 2018 con anomalías más positivas.

Respecto a las anomalías del albedo VIS en el proceso de urbanización, es destacable el mes de junio para el 2000 mientras que para 2018 no resulta ser significativa. Similar es el caso para el proceso de expansión agrícola.

3.3 Respuesta climática esperada general y por zonificación

En la Tabla 2 se registró el comportamiento de cada variable estudiada según los procesos de urbanización y expansión agrícola. Esta tabla se utilizó en combinación con las 6 zonas identificadas en la sección 2.3.5.1 para un análisis a nivel local más preciso de las tendencias y patrones de cada una de las variables climáticas, albedo, y NDVI entre 2000 y 2018.

3.3.1 Mapas de calor

Las series de tiempo que se obtuvieron, a partir del procedimiento 2.2.4, se ordenaron geográficamente según lo detallado en la sección 2.3.5.1., de latitud norte a latitud sur, Figura 6, proceso de urbanización, y Figura 7, proceso de expansión agrícola. Dos líneas negras resaltadas dividen la zonificación por latitud

norte, media y sur de la Amazonía ecuatoriana, como lo dispuesto en la Figura 2, destacando la densidad de series en la zona de latitud media para los dos procesos.

3.3.1.1 Expansión urbana

En el proceso de urbanización los mapas de calor, Figura 6, sintetiza un total de 59 series de tiempo. Se especifica el comportamiento de los años 2000 al 2018 y en orden consecutivo los valores del *z-score* de enero a diciembre de cada año de izquierda a derecha. Las rampas de colores se asocian a los valores del *z-score* tomados como anomalías de cada serie. Los valores promedio y desviación estándar están asociados a cada serie, representados por cada fila del mapa de calor. Los colores divergentes, es decir, los valores extremos positivos y negativos de las rampas indican el grado de la anomalía, y un color neutro indica el rango de anomalías no inusuales, ver detalles de la interpretación en la sección 2.3.5.2.

Los valores de *z-score* más relevantes de la HR son en los años 2008, 2009, 2010, y 2011. En donde las anomalías más negativas rondaron por el primer semestre de cada año. En los años 2006, 2007, y 2014 se presentó el caso opuesto en el que las anomalías más positivas rondaron el primer semestre. Es posible diferenciar varios tramos dentro de cada una de las zonas, por ejemplo, en el tramo norte se distinguen dos tramos inferior y superior. En la zona media se distinguen tres tramos, y en la zona sur en un único tramo. Si bien existen diversidad de variaciones de los *z-score*, resulta evidente una pérdida de uniformidad de izquierda a derecha, especialmente a partir de 2008 en la mayoría de las series.

Las anomalías en la HR para el periodo de análisis alcanzan valores ($> +5$ desviaciones estándar). Sin embargo, estas se deben a valores de diciembre del año 2018, que potencialmente pueden generar confusión por efectos de borde de serie en el proceso de suavizado con el filtro S-G. Se destaca el incremento en la densidad de las anomalías azules, es decir las negativas, resultantes de una menor HR local de los centroides analizados. Estos a su vez, antes de 2008, solían presentarse en el primer semestre del año y luego evolucionar a anomalías positivas para el segundo semestre del año. Sin embargo, las anomalías negativas se han dividido en dos segmentos del año primer cuatrimestre y tercer cuatrimestre, a partir de 2014. Mientras que las anomalías positivas son cada vez menos frecuentes, a partir de 2015, y acentuadas en el segundo cuatrimestre del año. En general, se confirma la percepción de disminución local de HR (Tabla 2) con el proceso de urbanización especialmente con aumento de la frecuencia de eventos de baja HR en el primer y tercer cuatrimestre del año, incluso llegando a cubrir anomalías negativas recurrentes en el segundo semestre del año para el 2018.

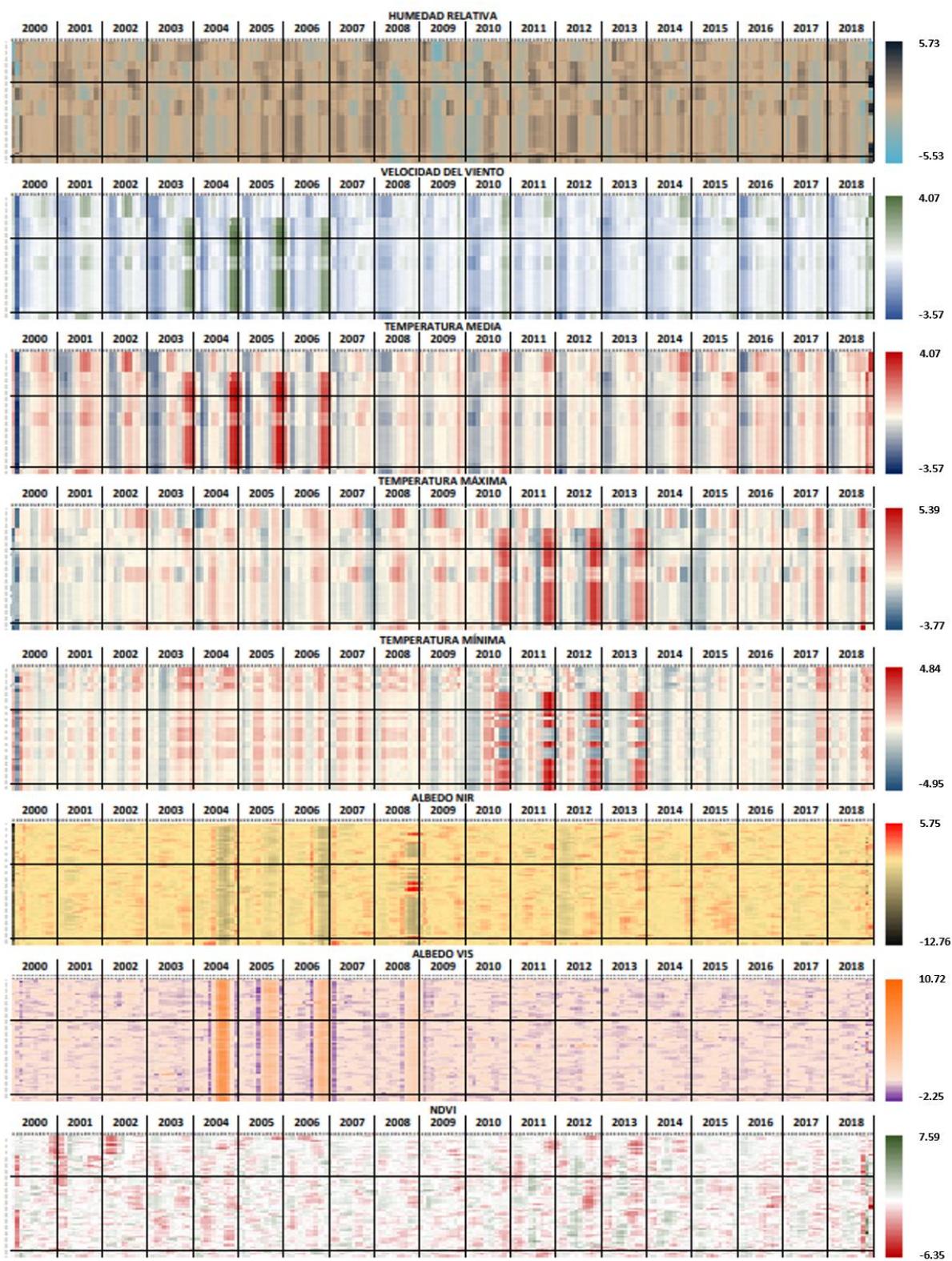


Figura 6. Mapas de calor de los z-score de las series temporales de las variables climáticas, albedo y NDVI para el proceso de urbanización.

En cuanto a los valores de *z-score* de la VV, se destaca las anomalías positivas en el tramo inferior de la zona norte y la zona media en los años 2004, 2005, y 2006. En estos, se ve un incremento de la VV al final de cada año. Al ser un comportamiento generalizado en este tramo, esta anomalía corresponde a un evento regional y no podríamos atribuirlo al cambio de CUS. Sin embargo, a partir de 2007 es posible detectar una zona de alternancia entre anomalías positivas y negativas no tan extremas que permiten inferir un esquema diferente en el comportamiento de la VV con respecto al periodo 2000-2006. La marcación de las anomalías si bien tiene una influencia regional, negativas en el primer cuatrimestre del año y positivas en el tercer y cuarto cuatrimestre del año son cada vez de menor magnitud. Esto es posible visualizarlo en el periodo 2012-2018. Lo anterior permite confirmar la percepción del cambio de la VV de la Tabla 2. Es importante destacar que la estabilización de la VV, con relación a eventos anómalos, resulta evidente a partir de la generalización de la zona neutra o de anomalías no inusuales al final de las series a partir de 2012. Las anomalías en la variable VV alcanzan valores cercanos a ± 4 desviaciones estándar destacando la relevancia en las anomalías en esta variable dado el CUS.

Los valores del *z-score* en mapas de calor para las temperaturas comparten la misma rampa de color y alcanzan valores cercanos a ± 4 y ± 5 desviaciones estándar. El resultado más relevante es que no necesariamente los valores anómalos de temperaturas mínima y máxima producen valores anómalos en la temperatura promedio o viceversa. En el caso del proceso de urbanización, se destacan las anomalías regionales en el periodo comprendido entre 2003- 2006 en el último cuatrimestre para el tramo inferior de la zona norte y la zona media. Similar es el caso para la temperatura máxima y mínima en el periodo 2010-2013. Sin embargo, en este último se detecta una variación anómala opuesta en el tramo medio de la zona media en el que las anomalías fueron negativas. Las anomalías positivas en la temperatura máxima y las anomalías negativas en la temperatura mínima tienden a ser más recurrentes al igual que la alternancia con valores cercanos a ± 5 desviaciones estándar del *z-score*. Las anomalías en el tramo superior norte, el tramo medio de la zona media, y la zona sur guardan correlación en las intensidades de las anomalías en la temperatura máxima debido a que corresponden a zona de Sierra. A diferencia de las anomalías en el tramo norte de la temperatura mínima la cual es tendencialmente distinta, alternante y opuesta a la zona media y sur. A partir de 2016, las anomalías de la temperatura mínima en el último cuatrimestre del periodo 2016-2018 son marcadamente positivas. La percepción de variación de las temperaturas máximas fue acertada, en cuanto se urbaniza un área la temperatura máxima local tiende a ser más alta, a pesar de que hay anomalías negativas también, tienden a ser más extremas (magnitud) las anomalías positivas, colores rojos a partir de 2010. En contraste, se esperaba que las temperaturas mínimas fueran más mínimas, representadas por anomalías negativas (azules), Tabla 2. Sin embargo, es

visible que las temperaturas mínimas presentan con mayor frecuencia anomalías positivas, especialmente en el último cuatrimestre, a partir de 2010.

Las anomalías del albedo NIR en los años 2004, 2006, y 2008 mostraron valores extremos en el último semestre mostrando un mes de anomalías positivas seguido por un periodo de cinco o seis meses de anomalías negativas para darle paso nuevamente a un mes de anomalías positivas. Sin embargo, en el año 2008 hubieron ciertos puntos que mostraron un comportamiento opuesto. A pesar de que las anomalías negativas son, en magnitud, superiores a las anomalías positivas, la frecuencia de las anomalías positivas es superior. Además, a partir de 2009 las anomalías negativas son muy escasas. La percepción de variación del albedo NIR en el proceso de urbanización era de disminución, pero en este caso sucedió lo opuesto. Las anomalías positivas no suelen ser mayores a las anomalías en el intervalo de *z-score* [-1,1] que son no inusuales. Sin embargo, las anomalías positivas raras y muy raras rondan valores de hasta +5 desviaciones estándar, lo cual contrasta con las anomalías negativas que alcanzaron valores de hasta -12 desviaciones estándar.

Los años 2004, 2005, 2006 y 2008 se destacan los valores de *z-score* de albedo VIS en el proceso de urbanización en el segundo semestre con anomalías positivas que rondan valores de hasta +10 desviaciones estándar. Se caracterizan por presentar un mes previo de anomalías negativas seguido por cinco o seis meses de anomalías positivas, y finalmente cierra con un mes de anomalía negativa. Debido al carácter general de este evento, se puede decir que este ha sido a escala regional afectando a todos los puntos. Este evento de anomalía está relacionado con las anomalías del albedo NIR a excepción del año 2005 que presentó anomalías menos intensas. A partir de 2009, las anomalías son alternantes y no siguen una tendencia clara. Sin embargo, las anomalías negativas son más frecuentes que las anomalías positivas. Lo anterior confirma la percepción de disminución del albedo VIS de la Tabla 2. Las anomalías del albedo vis se destacan en su magnitud, ya que las anomalías negativas son inferiores a -3 desviaciones estándar, mientras que las positivas superan hasta las + 10 desviaciones estándar.

Los *z-score* del NDVI con respecto al proceso de urbanización fueron más frecuentes as anomalías negativas. Se destacan las anomalías negativas de la zona norte entre el 2000 y 2022, así como 2011 a 2013. Las anomalías positivas alcanzaron valores de hasta +7.6 desviaciones estándar mientras que las anomalías negativas llegaron hasta - 6.35 desviaciones estándar. Según la percepción de cambio de la Tabla 2, el NDVI en el proceso de urbanización debería disminuir, reflejando una mayor frecuencia en anomalías negativas. Los valores rojos, presentan mayor frecuencia, aunque alternante lo que podría indicar presencia de vegetación en las zonas que han sido urbanizadas. A pesar de esta situación las

anomalías negativas son más frecuentes, confirmando la percepción descrita en la Tabla 2. No se perciben diferencias relevantes en los mapas de calor, entre las zonas norte, media, y sur con respecto a la variabilidad del NDVI.

3.3.1.2 Expansión agrícola

En el proceso de expansión urbana los mapas de calor, Figura 7, resumen un total de 186 series de tiempo. En la figura se muestra la evolución temporal de los años 2000 al 2018 y en orden consecutivo los valores del *z-score* de enero a diciembre de cada año de izquierda a derecha. Las rampas de colores se asocian a los valores del *z-score* tomados como anomalías de cada serie. Los valores promedio y desviación estándar están asociados a cada serie, representados por cada fila del mapa de calor. Los colores divergentes, es decir, los valores extremos positivos y negativos de las rampas indican el grado de la anomalía, y un color neutro indica el rango de anomalías no inusuales, ver detalles de la interpretación en la sección 2.3.5.2.

Los valores de humedad relativa (HR) con respecto al proceso de expansión agrícola muestra anomalías dispersas entre muy positivas para el primer semestre del año a unas muy negativas para el segundo semestre del año, presentando algunos desfases. Estos son aún más pronunciados en la zona sur del país. Las anomalías negativas más pronunciadas se destacan en el sur del país especialmente en el segundo semestre del año 2010 y a partir de allí hacia 2018 ha venido disminuyendo la anomalía negativa en el sector. La anomalía regional del primer semestre del año 2012 en la zona norte y media fue destacable con valores de superiores a +2 desviaciones estándar. Las anomalías negativas máximas (-3.68), en este caso, son superiores casi en 1 desviación estándar comparado con el máximo positivo (+2.71), evidenciando el carácter persistente de las mismas en el tercio medio del año natural. En comparación con las anomalías máximas, tanto positivas como negativas, entre el proceso de urbanización y expansión agrícola, las anomalías de la urbanización son bastante más extremas que alcanzan valores $> \pm 5$ desviaciones estándar. Así es posible comprobar la percepción de la variación de la humedad relativa en la Tabla 3, de disminución para expansión agrícola, representada por la frecuencia y magnitud de las anomalías azules o negativas.

Los valores de *z-score* para la velocidad del viento (VV), en el proceso de expansión agrícola son de carácter regional y podría decirse que esta variable no es sensible al cambio de CUS en la cobertura agropecuaria (rotación agrícola y pastos). Las variaciones regionales y las anomalías se caracterizan por ser positivas en el tercio medio del año con ciertos desfases al inicio entre los meses de abril y mayo y al final entre septiembre y octubre.

Las anomalías negativas suelen situarse entre el inicio y el fin de las anomalías positivas, con un intervalo de un mes o dos de anomalías no inusuales [-1,1]. Cabe destacar que a partir del año 2012 las anomalías positivas son cada vez más intensas y frecuentes entre junio y agosto. La percepción de aumento de la velocidad del viento en la expansión agropecuaria no estaría relacionada con el cambio de CUS. Los valores de las anomalías no reflejan un comportamiento alternante típico de un mosaico de cambios de cobertura agropecuaria. En comparación con el proceso de urbanización, la velocidad del viento en la expansión agrícola ronda como máximos valores $> \pm 2$ desviaciones estándar, mientras que en el proceso de urbanización se suele estar por los $> \pm 4$ desviaciones estándar.

Las variaciones en las anomalías de las temperaturas del proceso de expansión agrícola se destacan especialmente en las anomalías positivas. En el caso de las anomalías positivas de la temperatura media llegan a valores $> +9$ desviaciones estándar, en la temperatura máxima llega a valores $> +7$ desviaciones estándar, y en la temperatura mínima $> +6$ desviaciones estándar. Valores que superan los máximos en el proceso de urbanización, TMed. $> +4$ desviaciones estándar, TMáx. $> +5$ desviaciones estándar, y TMín. $> +4$ desviaciones estándar. Lo cual sugiere una mayor sensibilidad y cambio drástico de las temperaturas en las zonas con actividad de rotación agropecuaria que en aquellas de zonas urbanizadas.

El efecto de las rotaciones en el tramo superior y medio de la zona media presenta mayor distorsión en las anomalías positivas y negativas, sugiriendo variaciones locales de las temperaturas máximas. El año 2016 se destaca por presentar un entramado alternado de anomalías entre muy positivas y negativas en el segundo semestre del año. En ciertos casos las anomalías entre TMáx. y TMín. tienen correlación, pero en otras, en el tramo inferior de la zona media suelen ser opuestos. Se destacan además las anomalías negativas de los años 2009-2010 y 2015-2016, en los que los valores de TMáx. y TMín. presentan anomalías positivas extremas y marcadas especialmente durante el primer cuatrimestre, efecto de carácter regional.

Para el caso de las anomalías en el albedo NIR Y VIS, se destaca especial atención en la magnitud de las anomalías negativas alcanzando valores de $> +10$ desviaciones estándar, y $> +8$ desviaciones estándar, respectivamente. Existe una relación opuesta entre las anomalías NIR y VIS, las cuales son evidentes en el inicio de los años 2013 y 2016. Pero las anomalías positivas del albedo VIS de 2011 no son correlacionadas con el albedo NIR en 2011. Como era de esperarse las anomalías positivas del albedo NIR son más frecuentes que en el albedo VIS. A pesar de ello, el albedo VIS suele presentar menores anomalías no inusuales que el albedo NIR en cuanto a las coberturas agrícolas.

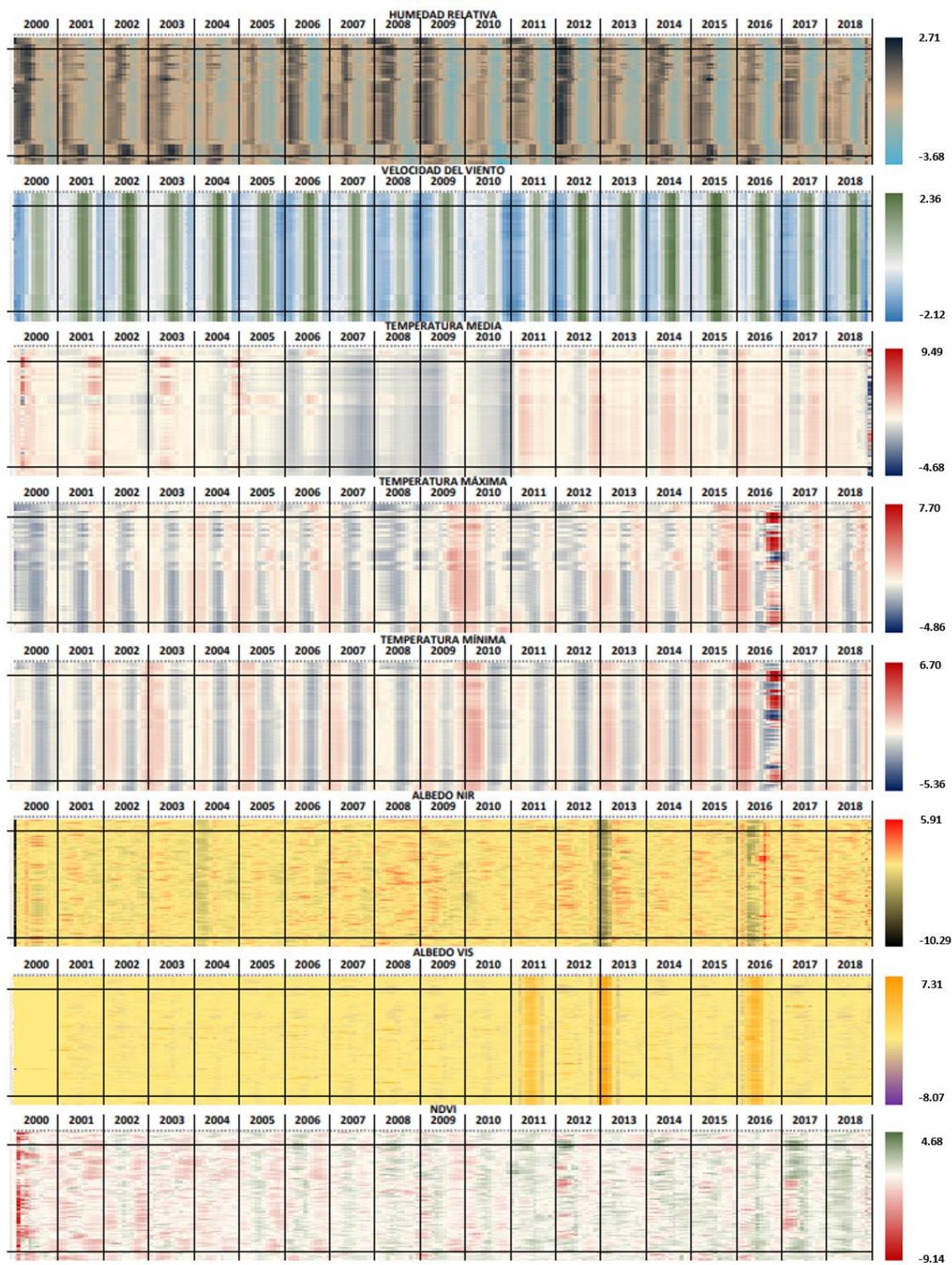


Figura 7. Mapas de calor de los z-score de las series temporales de las variables climáticas, albedo y NDVI para el proceso de expansión agrícola.

En agosto de 2016, es destacable el repunte regional de las anomalías positivas con pequeñas excepciones con anomalías no inusuales y otras que se extendieron un mes antes y un mes más. En el tramo superior de la zona media. En comparación con los eventos de albedo anómalos del proceso de urbanización (2004, 2005, 2006, y 2008) no coinciden con los del proceso de expansión agrícola (2011, 2013, y 2016), lo cual indica que las condiciones locales de la cobertura con respecto al albedo son distintas y que los efectos regionales no inciden en múltiples coberturas.

Las anomalías del NDVI en la expansión agrícola variaron de $> \pm 4$ desviaciones estándar, llegando incluso a anomalías positivas > -9 desviaciones estándar. La gran dispersión de las anomalías sugiere una gran sensibilidad de los efectos locales, ya que los efectos regionales no se concentran temporalmente ni en magnitud. Algunos rastros de efectos regionales suelen presentarse en la zona norte y media en el último trimestre del año (2000, 2011, 2012, y 2013) con algunos desfases en la 2002 hacia el primer trimestre del año. Las anomalías negativas en este caso de la expansión agrícola suelen ser superiores a las positivas, lo que concuerda con la percepción de disminución de la Tabla 2. Comparado los primeros años, el primer semestre de las series con el primer trimestre de los últimos años de las series, resultan ser las anomalías opuestas. Lo que sugiere una inversión temporal de los patrones de vigor vegetativo, pero cuando se presentan anomalías negativas en este mismo periodo estas suelen ser muy negativas (ver año 2017). A pesar de las anomalías positivas y negativas, el proceso de expansión agrícola tiene un gran porcentaje de persistencia en la zona de anomalías no inusuales de especial interés.

3.3.2 Efectos de la variación climática en la Sierra

Para evaluar los efectos de la variación climática local se empleó la agregación de acuerdo con las cuadrículas y zonificaciones descritas en las Figuras 2 y 3, respectivamente. Se empleó una representación gráfica de los *z-score* con violines (izquierda) y diagramas de caja (derecha) para visualizar de un lado la distribución y del otro las métricas de los datos. La comparación de estas últimas facilitaría la comprensión de las variaciones entre cuadrículas y del efecto de la intensidad de las anomalías en el clima local. Las figuras facilitan la comprensión más detallada del conjunto de centroides evaluados agregados por cuadrícula, así evaluar las diferencias de los efectos locales de los puntuales.

3.3.2.1 Expansión agrícola

La Figura 8 muestra las distribuciones de las anomalías. La interpretación de las figuras se debe hacer identificando como referencia, a izquierda, una distribución con forma de campana de gauss con mediana sobre el valor cero en el *z-score*, y a derecha un diagrama de cajas equilibrado donde la distancia entre el

Q1 y la mediana debería de ser simétrica con la distancia entre la mediana y el Q3. El rango intercuartílico (Q3 - Q1) lo más cercano a cero y como máximo un ancho de caja entre ± 1 desviaciones estándar, ya que dentro de este rango la anomalía se identifica como no inusual. Para el caso de las tierras altas de la zona norte es evidente que en las variables HR, VV, TMéd., TMín., y Albedo VIS presentan medianas con valores inferiores a cero, evidenciando una disminución generalizada en relación con la frecuencia de las anomalías. Por otro lado, la mediana del NDVI presenta anomalías positivas destacadas con una alta densidad a valores cercanos a +1 desviación estándar. La variable Albedo NIR tiene una distribución de campana de gauss con mediana en cero, pero grandes anomalías positivas y negativas. Para el caso de TMéd., TMín, Albedo VIS y NDVI las distribuciones presentan dos zonas de densidad haciendo que esta sea bimodal especialmente en la zona de anomalías negativas a excepción de la variable NDVI que muestra lo opuesto con altas densidades en las anomalías positivas.

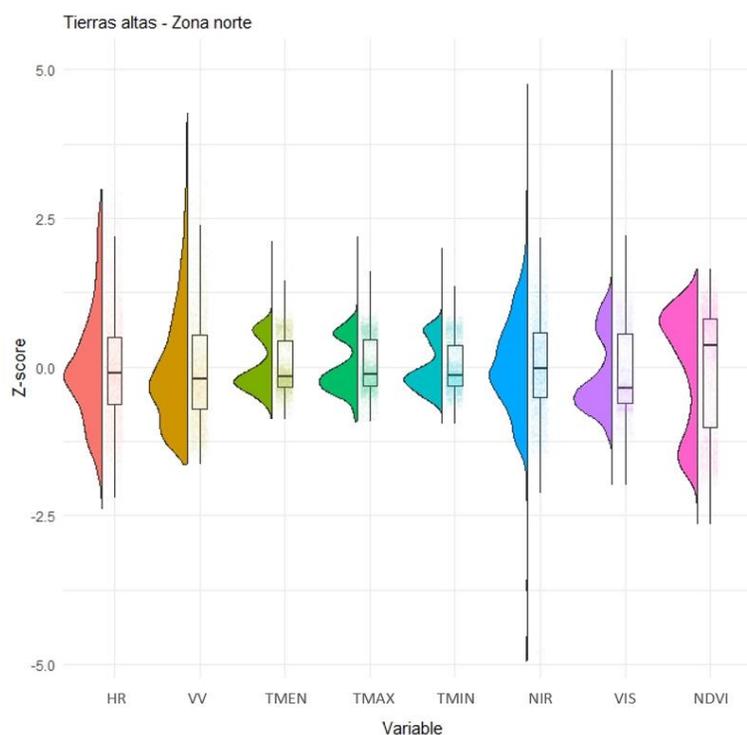


Figura 8. Diagrama de cajas y violines de las variables climáticas, albedo y NDVI en las tierras altas de la zona norte del proceso de expansión agrícola.

HR: humedad relativa [%], VV: velocidad del viento [m/s], TMéd.: temperatura máxima [°C], TMín.: temperatura mínima [°C], Albedo NIR: albedo del infrarrojo cercano, Albedo VIS: albedo visible, y NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada.

Es importante destacar el ancho entre el Q1 y la mediana de las variables TMed., TMéd., y TMín. y el ancho entre la mediana y el Q3 indicando una mayor densidad de las anomalías negativas y de las positivas indicando que las temperaturas alternan entre valores extremos, aunque la mayoría persisten en la zona de anomalías no inusuales [-1,1]. Sin embargo, en los tres casos las anomalías positivas si presentan

algunos valores que superan $> +1$ desviaciones estándar indicando que las tres temperaturas, de forma local, tienen una tendencia al alza en las anomalías positivas más marcada que las anomalías negativas. Esto quiere decir que las temperaturas son cada vez más extremas cuando presentan anomalías positivas que cuando presentan anomalías negativas.

Para mejorar la comprensión de las magnitudes de anomalías, y poder vincularlo con el contraste cuantitativo presentado en la sección 2.4.2 se presenta la Figura 9. En esta se muestran las magnitudes de las variaciones relacionadas con la magnitud propiamente dicha y no con respecto a la anomalía.

Tabla 6. Métricas de evaluación de los puntos de monitoreo de las variables climáticas seleccionadas en las tierras altas de la zona norte para el proceso de expansión agrícola.

Tierras Altas de la Zona Norte								
Variabes	HR	VV	TMáx.	TMed.	TMín.	Albedo NIR	Albedo VIS	NDVI
P5	60.82	2.22	10.95	6.85	2.85	0.16	0.03	0.21
Q1	64.21	2.87	12.25	8.05	3.95	0.19	0.04	0.34
Mediana	66.41	3.45	13.25	8.95	4.85	0.21	0.05	0.59
Q3	68.97	4.26	16.33	11.95	7.35	0.23	0.08	0.67
P95	75.18	5.88	17.65	13.45	9.05	0.26	0.10	0.74

HR: humedad relativa [%], VV: velocidad del viento [m/s], TMáx.: temperatura máxima [°C], TMín.: temperatura mínima [°C], Albedo NIR: albedo del infrarrojo cercano, Albedo VIS: albedo visible, y NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada.

Para el caso de las tierras altas de la zona media se identifican valores de z-score con anomalías no inusuales para la variable HR bastante equilibrados, pero es de destacar el peso de las anomalías que superan los ± 1.0 desviaciones estándar, por lo que la HR a pesar de su estabilidad de las anomalías en el periodo de estudio es importante su monitoreo continuo. La HR se relaciona muy de cerca con las temperaturas, la VV y la vegetación ya que interactúan constantemente debido al proceso de evapotranspiración. Pero es destacable en este caso que la WS en las zonas de rotación agrícola de la zona media presenta anomalías importantes ubicando a la mediana por debajo de 0 en el z-score, lo que significa que se incluso la WS disminuye progresivamente mientras se expanden las zonas de rotación agropecuaria en el tramo medio. La WS, de forma teórica, indica que a mayor velocidad del viento mayor evapotranspiración. En este caso, la disminución de HR estaría más condicionada por las temperaturas que por la VV. Con relación a las temperaturas TMed., TMáx., y Tmin, los z-score indican mayor abundancia de anomalías negativas incluso siendo mayores a -1.0 y particularmente existen también en menor medida un grupo de anomalías positivas superiores a $+1.0$.

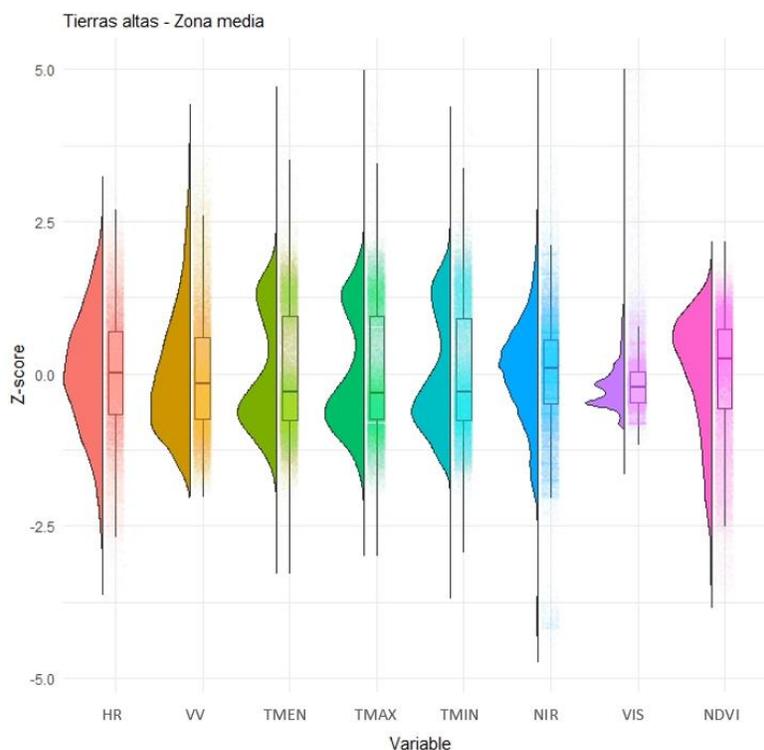


Figura 9. Diagrama de cajas y violines de las variables climáticas, albedo y NDVI en las tierras altas de la zona media del proceso de expansión agrícola.

HR: humedad relativa [%], VV: velocidad del viento [m/s], TMáx.: temperatura máxima [°C], TMín.: temperatura mínima [°C], Albedo NIR: albedo del infrarrojo cercano, Albedo VIS: albedo visible, y NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada.

En la zona alta del Ecuador es esperable que las temperaturas sean bajas por lo que un incremento de las temperaturas podría estar relacionado con variaciones en la HR. Para poder inferir el efecto de estas variaciones la variable NDVI, al mostrar anomalías positivas, confirma que la actividad agrícola es más intensiva por lo que se alcanzan mayores valores de NDVI. Para la variable albedo, especialmente para el albedo VIS presenta anomalías negativas, lo que confirma la rotación de la cobertura vegetal mostrando que a diferencia de la zona norte el albedo en esta zona muestra una dinámica mucho más corta en la que el suelo queda menor tiempo en barbecho o suelo desnudo. En esta zona media, las rotaciones podrían ser mucho más rápidas que en la zona alta norte para el proceso de expansión agrícola. Posiblemente este hecho se relaciona con la predominancia de la agricultura sobre la actividad ganadera. El albedo NIR muestra una dispersión grande de valores al igual que en la zona norte debido a la intensidad de la actividad y de la cobertura vegetal extendida en estas zonas.

La Tabla 7 muestra algunos valores de interés respecto a las variables. Los valores indican que el clima local de la parte alta en el tramo medio es relativamente más seco que el tramo alto norte con una HR que llega a valores des hasta 75%. Esto podría justificar en parte, una mayor aptitud climática que

favorecería la expansión de la rotación agrícola. Incluso con mayor potencial que en la zona alta norte debido a menores condiciones de la VV. Con relación a las TMín. la zona norte a diferencia de la zona media podría presentar menores riesgos de heladas ya que en el tramo medio el P05 de la TMín. podría rondar el 1.35°C y exponer la producción agrícola a riesgos de pérdidas por condiciones de helada que en combinación con menor HR incrementa el riesgo de pérdidas agropecuarias en la zona. Los valores de NDVI alcanzan valores de P95 de hasta 0.78 por lo que la actividad agrícola y/o producción de pastos presenta un potencial enorme en la zona a pesar de los posibles riesgos climáticos relacionados con la HR y VV.

Tabla 7. Métricas de evaluación de los puntos de monitoreo de las variables climáticas seleccionadas en las tierras altas de la zona media para el proceso de expansión agrícola.

Tierras Altas de la Zona Media								
Variables	HR	VV	T Med.	T Máx.	T Mín.	Albedo NIR	Albedo VIS	NDVI
P05	60.64	1.77	5.85	9.95	1.35	0.13	0.03	0.26
Q1	64.31	2.53	7.25	11.35	2.85	0.18	0.04	0.46
Mediana	66.74	3.27	8.45	12.45	4.05	0.20	0.05	0.57
Q3	69.16	4.21	11.65	15.65	7.15	0.22	0.06	0.64
P95	72.58	5.88	13.45	17.45	9.15	0.25	0.09	0.71

HR: humedad relativa [%], VV: velocidad del viento [m/s], TMáx.: temperatura máxima [°C], TMín.: temperatura mínima [°C], Albedo NIR: albedo del infrarrojo cercano, Albedo VIS: albedo visible, y NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada.

En la Figura 10, para el caso de la zona alta sur en la rotación agrícola, es de destacar la estabilidad climática en términos de temperatura. Únicamente destacando un pequeño sesgo en la cola de los z-score de la TMáx. y TMín., lo que traduce en un incremento de las temperaturas extremas. Si bien, esto no supone una anomalía de preocupación inmediata, son valores que posiblemente van a empezar a tomar relevancia frente al riesgo de la sequía y las heladas. Posiblemente porque en la zona alta sur la predominancia de la rotación agrícola sea más en el establecimiento de potreros para pastoreo, esto debido a la escasa variabilidad del Albedo VIS y un NDVI estable con un leve sesgo sobre anomalías positivas alrededor de +1.0. Para la variable VV se presenta un sesgo negativo de la mediana de los z-score asociado con la pérdida de rugosidad del terreno al cambiar zonas de bosque a pastizales de pastoreo o agricultura de ciclo corto diferente a frutales, confirmando la percepción de la Tabla 2. La gran amplitud de la distribución de las anomalías del albedo NIR se denota en una rotación considerable de los pixeles analizados dada la práctica del barbecho entre rotación con cultivos y/o rotación agricultura-pastizal debido a la exposición del suelo desnudo.

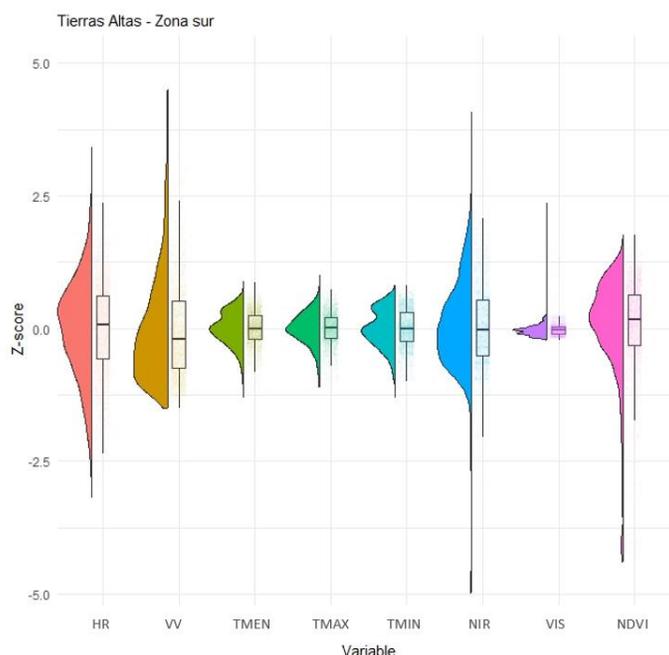


Figura 10. Diagrama de cajas y violines de las variables climáticas, albedo, NDVI en las tierras altas de la zona sur del proceso de expansión agrícola.

HR: humedad relativa [%], VV: velocidad del viento [m/s], TMáx.: temperatura máxima [°C], TMín.: temperatura mínima [°C], Albedo NIR: albedo del infrarrojo cercano, Albedo VIS: albedo visible, y NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada.

Respecto a los valores de las métricas observada en el clima local para el proceso de rotación agrícola de la Tabla 8, el P95 y el P05 tanto de la variable TMín. y TMáx. presenta los valores máximos y mínimos respectivamente, entre todas las zonas de la parte alta, por lo que le confiere una zona de especial interés para la medición de efectos de la variabilidad climática en la agricultura debido al impacto que puede ocasionar. Incluso es de esperar que la zona sur sea proclive a una expansión mayor de la rotación agrícola debido a las condiciones climáticas favorables en términos de amplitud térmica. Reflejo de ellos es máximo valor de NDVI en el P95 entre todas las zonas por lo que la asociación de la cobertura del uso del suelo con la respuesta climática es coherente a la percepción técnica esperada de la Tabla 2.

Tabla 8. Métricas de evaluación de los puntos de monitoreo de las variables climáticas seleccionadas en las tierras altas de la zona sur para el proceso de expansión agrícola.

Tierras Altas de la Zona Sur								
Variables	HR	VV	T Med.	T Máx.	T Mín.	Albedo NIR	Albedo VIS	NDVI
P05	63.25	1.65	9.95	13.45	5.85	0.16	0.02	0.36
Q1	67.23	2.07	11.95	15.35	7.85	0.18	0.03	0.60
Mediana	69.58	2.59	12.95	16.35	9.05	0.20	0.04	0.67
Q3	71.55	3.29	14.25	17.35	10.75	0.22	0.05	0.74
P95	74.56	4.72	15.55	18.75	12.05	0.25	0.07	0.81

HR: humedad relativa [%], VV: velocidad del viento [m/s], TMáx.: temperatura máxima [°C], TMín.: temperatura mínima [°C], Albedo NIR: albedo del infrarrojo cercano, Albedo VIS: albedo visible, y NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada.

3.3.2.2 Urbanización

Los cambios del clima local con relación a la zonificación presentan variaciones importantes entre la zona norte, media y sur. De igual forma se presentan características notables en las anomalías en las zonas media y sur para el proceso de urbanización. Este proceso supone un cambio de mayor impacto en el territorio con relación a algunas de las variables climáticas. En este se destacan los efectos del aumento de las temperaturas reflejo de la baja capacidad de amortiguamiento en relación con la capacidad de amortiguamiento térmico que posee la vegetación.

Para el caso de las tierras altas de la zona norte urbanizadas en el periodo de estudio, se destaca la ligera variación del albedo NIR y VIS con anomalías del z-score en torno a ± 1.0 desviaciones estándar, Figura 11. Lo anterior supone una estabilización del albedo de las zonas urbanas que es de esperar puesto que la mayor superficie está compuesta por zonas construidas o inertes. Las variaciones en la VV son de especial interés en el proceso de urbanización ya que, durante el proceso de urbanización, la cobertura vegetal sobre el suelo se elimina en el periodo inicial, donde posteriormente se edifica resultando en aumento de la VV, para luego reducir debido al emplazamiento de estructuras geométricas regulares como pueden ser casas, naves o edificios. Por lo anterior, la VV presenta un mayor porcentaje de anomalías negativas incluso que sobrepasan los +2.0 desviaciones estándar o una cola izquierda más pesada que la derecha. En cuanto a las temperaturas, la TMed. y la TMáx. presentan un rango de anomalías equivalente específicamente motivado por las anomalías en la TMáx. Se destaca una concentración de temperaturas máximas anómalas superior a +2.0 desviaciones estándar, posiblemente relacionadas con zonas urbanas consolidadas con un P95 de 28.35°C, Tabla 9. La amplitud de las anomalías para la variable TMáx., que van desde un P05 de 15.05°C hasta un P95 de 28.35°C, da cuenta de la gravedad de la variación de la temperatura máxima en las zonas urbanizadas. El impacto de las zonas urbanas en el efecto isla de calor es detectable a la escala analizada en este trabajo en la zona de alta norte del Ecuador para el periodo 2000-2018.

Otro efecto importante es sobre la TMín., en la que contrario a TMáx. y TMed. la mediana de las anomalías resulta ser positiva y un grupo de anomalías residual negativo. Esto se puede explicar por un incremento de la TMín en las zonas ya consolidadas y una variabilidad del grupo de anomalías residuales negativas explicada por urbanización de baja densidad o en proceso de consolidación que se diferencia de la persistente anomalía positiva de la zona urbanizada. El incremento de la TMín se da posiblemente por el incremento de los volúmenes de materiales refractarios en techos, vías, y edificaciones. Con relación a la variable NDVI, este se ve poco alterado con una mediana cercana a cero sin embargo la proporción

espacial y temporal de zonas consolidadas versus las zonas de baja intensidad permiten establecer un rango amplio pero simétrico de las anomalías lo que evidencia que las zonas urbanizadas tienen presencia de vegetación.

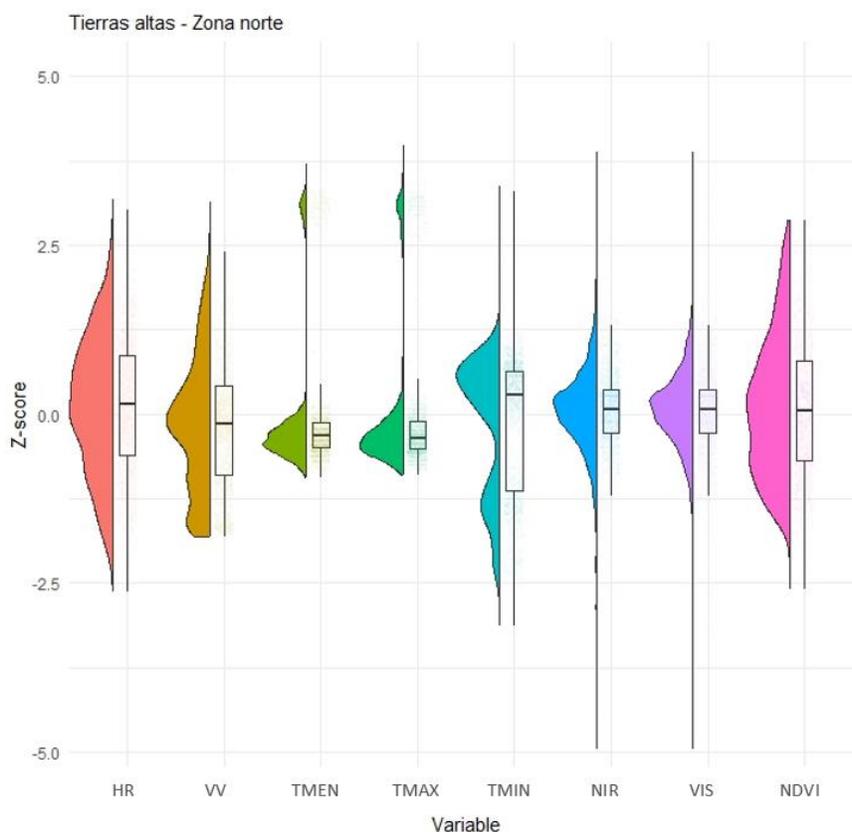


Figura 11. Diagrama de cajas y violines de las variables climáticas, albedo y el NDVI en las tierras altas de la zona norte del proceso de urbanización.
 HR: humedad relativa [%], VV: velocidad del viento [m/s], TMáx.: temperatura máxima [°C], TMín.: temperatura mínima [°C], Albedo NIR: albedo del infrarrojo cercano, Albedo VIS: albedo visible, y NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada.

Comparando los valores de la Tabla 6 y de la Tabla 9, correspondientes a la zona alta es evidente los cambios de HR que para expansión agrícola se destaca una mayor HR, VV en el P95, pero en términos temperaturas la TMáx. de la urbanización con un P95 de 28.35°C es comparablemente superior a P95 de 17.65°C lo que es una diferencia de 10.7°C mostrando así un resultado muy preocupante incluso para considerar para posibles estudios futuros de cambio climático. Evaluando las temperaturas promedio se tendría una diferencia de P95 en urbanización de 25.15°C versus un P95 en expansión agrícola de 13.45°C, una diferencia de 11.7°C que resulta ser aún mayor que en el análisis de las máximas. La comparación de TMín. se destaca el P05 entre los procesos de CUS, los valores extremos de la TMín. con valores hasta de 1.75°C, lo que es 1.1°C que podría atribuirse a la georreferenciación de algunos puntos a mayor altitud

para las zonas de expansión agrícola superiores que las zonas urbanizadas y a la expansión en zonas de páramo.

Tabla 9. Métricas de evaluación de los puntos de monitoreo de las variables climáticas seleccionadas en las tierras bajas zona norte para el proceso de urbanización.

Tierras Altas de la Zona Norte								
Variables	HR	VV	TMed.	TMáx.	TMín.	Albedo NIR	Albedo VIS	NDVI
P05	59.92	0.89	10.65	15.05	1.75	0.17	0.17	0.24
Q1	62.49	1.82	11.45	15.75	4.45	0.20	0.20	0.33
Mediana	64.58	2.46	12.15	16.45	7.55	0.21	0.21	0.42
Q3	66.76	3.07	12.95	17.25	8.35	0.21	0.21	0.53
P95	69.60	4.19	25.15	28.35	9.15	0.23	0.23	0.71

HR: humedad relativa [%], VV: velocidad del viento [m/s], TMáx.: temperatura máxima [°C], TMín.: temperatura mínima [°C], Albedo NIR: albedo del infrarrojo cercano, Albedo VIS: albedo visible, y NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada.

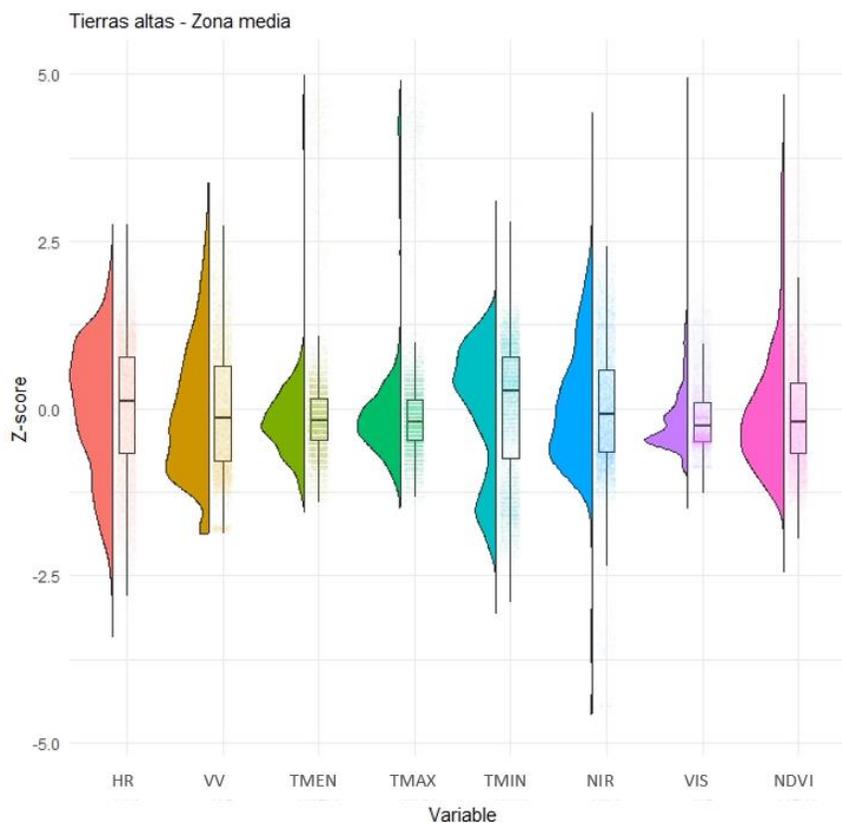


Figura 12. Diagrama de cajas y violines de las variables climáticas, albedo, y NDVI en las tierras altas de la zona media del proceso de urbanización.

HR: humedad relativa [%], VV: velocidad del viento [m/s], TMáx.: temperatura máxima [°C], TMín.: temperatura mínima [°C], Albedo NIR: albedo del infrarrojo cercano, Albedo VIS: albedo visible, y NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada.

La Figura 12 muestra la dispersión de las anomalías del proceso de urbanización para la zona media. En estas se destaca un comportamiento similar al observado en las temperaturas de las tierras altas y zona norte. A diferencia de la zona norte el albedo NIR y VIS se diferencian mostrando un NIR mucho más dispersa entre anomalías positivas y negativas y una leve asimetría hacia las anomalías negativas. Esta dispersión en albedo NIR se relaciona con una variación negativa en la actividad fotosintética de la cobertura y confirmado por el NDVI con ligero sesgo negativo de las anomalías. Es de destacar la estabilidad del Albedo VIS con un rango intercuartílico de 0.02 en las anomalías, lo que da cuenta de la consolidación de las zonas de expansión urbana en las tierras altas de la zona media del Ecuador para el periodo 2000-2018, ver Tabla 10. Sin embargo, el NDVI y albedo VIS permiten deducir que estas zonas, consolidadas como zona urbana, presentan un grado de actividad fotosintética de interés. Ya que sus valores permiten confirmar la presencia de vegetación. Lo que en parte podría ayudar a mitigar la amplitud térmica que es más marcada en el proceso de urbanización de las tierras altas de la zona norte del Ecuador.

Tabla 10. Métricas de evaluación de los puntos de monitoreo de las variables climáticas seleccionadas en las tierras altas zona media para el proceso de urbanización.

Tierras Altas de la Zona Media								
Variables	HR	VV	TMed.	TMáx.	TMín.	Albedo NIR	Albedo VIS	NDVI
P05	60.94	0.91	10.85	15.55	0.85	0.13	0.04	0.21
Q1	64.06	1.34	11.85	16.35	4.55	0.15	0.04	0.28
Mediana	66.25	1.87	12.45	16.85	8.15	0.17	0.05	0.33
Q3	68.08	2.52	13.15	17.45	9.95	0.19	0.06	0.41
P95	69.93	3.56	17.09	21.25	11.65	0.23	0.09	0.63

HR: humedad relativa [%], VV: velocidad del viento [m/s], TMáx.: temperatura máxima [°C], TMín.: temperatura mínima [°C], Albedo NIR: albedo del infrarrojo cercano, Albedo VIS: albedo visible, y NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada

La Figura 13 muestra la dispersión de las variables climáticas por el CUS de urbanización en la zona sur en el que se destaca la homogeneidad de las variables a diferencia de la VV que se ha visto disminuida hacia anomalías negativas posiblemente debido al incremento de las construcciones. Con respecto a las otras zonas de urbanización de la zona alta esta podría decirse que es la que menor impacto presenta. Si bien hay anomalías, estas son distribuidas con menor desplazamiento del cero en el z-score a excepción de la VV.

En la Tabla 11, es de relatar que mientras existen VV con anomalías mayoritariamente negativas, el P95 alcanza valores de hasta 5.02 m/s lo que le hace que sea la zona en la que mayor recurso eólico se presente. Sin embargo, debido al efecto de urbanización este viene disminuyendo de manera local en las zonas urbanizadas. La variación del P95 entre las TMáx. de la zona media y zona sur varían 0.01°C lo que

sugiere un entorno regional común en términos de temperatura posiblemente debido a la baja diferencia altitudinal entre las zonas urbanizadas y el modelo urbanístico equivalente.

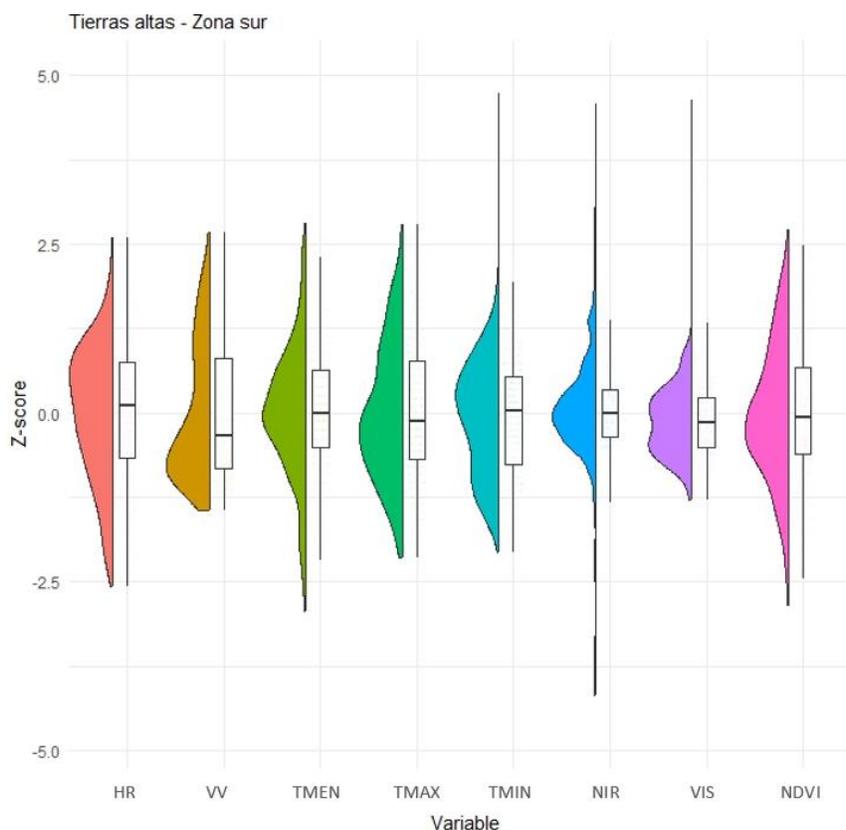


Figura 13. Diagrama de cajas y violines de las variables climáticas, albedo, y NDVI en las tierras altas de la zona sur del proceso de urbanización.

HR: humedad relativa [%], VV: velocidad del viento [m/s], TMáx.: temperatura máxima [°C], TMín.: temperatura mínima [°C], Albedo NIR: albedo del infrarrojo cercano, Albedo VIS: albedo visible, y NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada

Otro aspecto para resaltar es que las zonas urbanizadas del tramo alto amazónico del Ecuador presentan valores de NDVI que varían entre 0.21 en el P05 a 0.71 en el P95 por lo que podría decirse que la vegetación es un elemento presente en las zonas de expansión urbana consolidada.

Tabla 11. Métricas de evaluación de los puntos de monitoreo de las variables climáticas seleccionadas en las tierras altas zona norte para el proceso de urbanización.

Tierras Altas de la Zona Sur								
Variables	HR	VV	T Med.	TMáx.	TMín.	Albedo NIR	Albedo VIS	NDVI
P05	59.86	2.26	14.75	18.45	4.85	0.15	0.04	0.37
Q1	63.38	2.57	15.85	19.15	5.55	0.17	0.05	0.46
Mediana	65.73	2.99	16.25	19.65	6.35	0.18	0.05	0.51
Q3	67.62	4.04	16.75	20.45	6.85	0.19	0.06	0.58
P95	69.71	5.02	17.65	21.35	7.65	0.22	0.07	0.69

HR: humedad relativa [%], VV: velocidad del viento [m/s], TMáx.: temperatura máxima [°C], TMín.: temperatura mínima [°C], Albedo NIR: albedo del infrarrojo cercano, Albedo VIS: albedo visible, y NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada.

La Figura 14 muestra el conjunto de anomalías de la zona norte de tierras bajas en el proceso de urbanización. En esta es destacable la homogeneidad de las anomalías de las temperaturas por lo que no podría atribuirse un especial interés a las variaciones de la temperatura debido a la urbanización. Sin embargo, la $TM_{\text{máx.}}$ presenta un ligero sesgo hacia anomalías positivas que influye en las anomalías positivas de la $TM_{\text{med.}}$. Un suceso que debe monitorearse con mayor detalle a escala puntual para valorar los efectos de la urbanización en las tierras bajas del Ecuador en la zona norte. Las anomalías del NDVI son de especial interés en este caso ya que, contrario a lo planteado en la Tabla 2, el NDVI en este caso sucede lo inverso, y es que existen mayoría de anomalías positivas. Posiblemente debido a la baja densidad de construcciones, donde estas incluso pueden llegar a tener huertos en los que se cultive o vegetación con riego dentro de la zona urbana expandida.

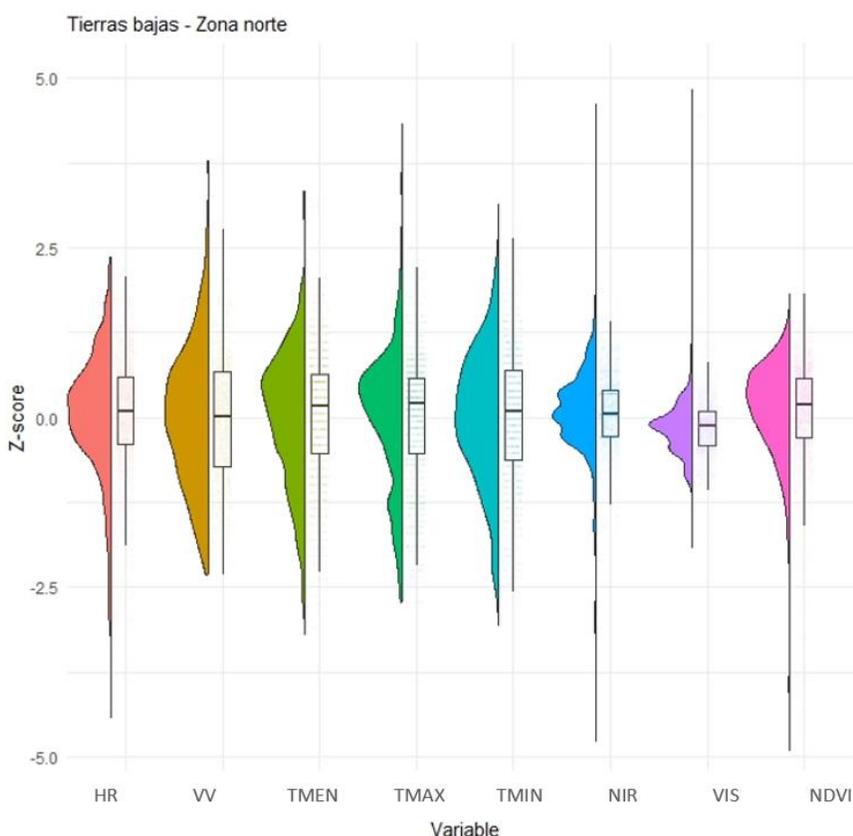


Figura 14. Diagrama de cajas y violines de las variables climáticas, albedo, y NDVI en las tierras bajas de la zona norte del proceso de urbanización.

HR: humedad relativa [%], VV: velocidad del viento [m/s], $TM_{\text{máx.}}$: temperatura máxima [°C], $TM_{\text{mín.}}$: temperatura mínima [°C], Albedo NIR: albedo del infrarrojo cercano, Albedo VIS: albedo visible, y NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada.

En la Tabla 12 se muestran los valores de referencia de las variaciones de las variables climáticas, albedo y NDVI para las tierras bajas de la zona norte. En estas se destaca la poca diferencia entre la $TM_{\text{med.}}$ y $TM_{\text{máx.}}$ de alrededor de 3°C mientras que los valores de la $TM_{\text{mín.}}$ podrían llegar a valores de 2.62°C a 5.95°C, una

amplitud térmica de gran interés especialmente para el establecimiento del confort térmico cuando se tienen HR entre 66% y 75%. Unas condiciones de habitabilidad bastante complejas para el confort térmico de una edificación. Los valores de NVI varían entre 0.62 y 0.83 lo que muestra que la vegetación está presente en el entramado urbano y con muy buena actividad fotosintética, posiblemente por huertos de cuidado y/o autoconsumo, por zonas ajardinadas extensas, o por remanentes de vegetación nativa que se integran dentro del proceso de expansión urbana. Especialmente, se destacan árboles de gran envergadura en parques, plazas, y calles principales.

Tabla 12. Métricas de evaluación de los puntos de monitoreo de las variables climáticas seleccionadas en las tierras bajas zona norte para el proceso de urbanización.

Tierras Bajas de la Zona Norte								
Variables	HR	VV	TMed.	TMáx.	TMín.	Albedo NIR	Albedo VIS	NDVI
P05	66.75	0.79	23.45	26.15	2.62	0.19	0.03	0.62
Q1	70.30	0.92	24.55	27.65	3.85	0.22	0.04	0.71
Mediana	71.55	1.02	25.15	28.45	4.55	0.23	0.05	0.76
Q3	72.77	1.11	25.55	28.85	5.15	0.24	0.05	0.80
P95	74.69	1.25	26.15	29.85	5.95	0.26	0.08	0.83

HR: humedad relativa [%], VV: velocidad del viento [m/s], TMáx.: temperatura máxima [°C], TMín.: temperatura mínima [°C], Albedo NIR: albedo del infrarrojo cercano, Albedo VIS: albedo visible, y NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada.

En el proceso de urbanización de las tierras bajas zona media, es importante destacar la variación de la VV ya que presenta un sesgo concentrado y negativo, Figura 15. Por lo que la disminución de la VV debido al proceso de urbanización es importante pero contrario a lo sucedido en la zona norte, Figura 14. La variación en las anomalías de las temperaturas TMed. y TMáx. es muy similar en este caso y para la zona norte. Sin embargo, en estas un grupo de anomalías negativas es importante y requiere de mayor estudio.

Efecto contrario es el caso de la TMín., donde presenta un sesgo hacia anomalías negativas y una pequeña cola en las anomalías positivas. Por lo que podría decirse que es importante evaluar cada caso con mayor detalle, incluso píxel a píxel ya que posiblemente efectos regionales puedan estar afectando la variabilidad térmica en la zona. Al igual que la zona norte el NDVI presenta un sesgo positivo de las anomalías, posiblemente por las mismas razones expuestas para la zona norte.

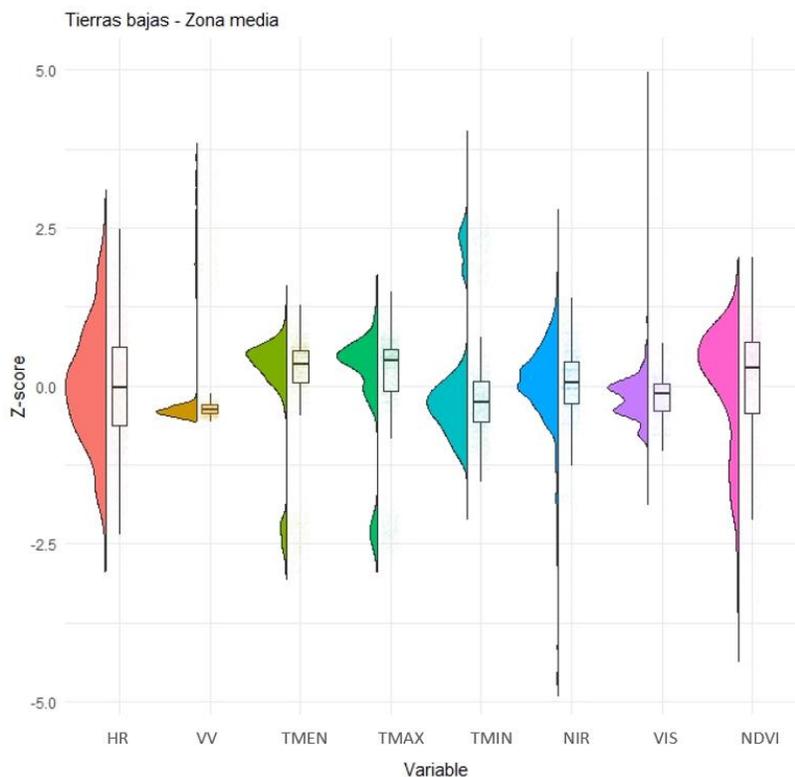


Figura 15. Diagrama de cajas y violines de las variables climáticas el albedo y el NDVI en las tierras bajas de la zona media del proceso de urbanización.

HR: humedad relativa [%], VV: velocidad del viento [m/s], TMáx.: temperatura máxima [°C], TMín.: temperatura mínima [°C], Albedo NIR: albedo del infrarrojo cercano, Albedo VIS: albedo visible, y NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada.

En la zona de tierras bajas de la zona media, Tabla 13, se presenta una ligera disminución de la HR en comparación con la zona norte, la cual es mucho más húmeda. Sin embargo, el proceso de urbanización no afecta de manera local un cambio en la HR. La VV en la zona media es mucho mayor que la zona norte por lo que las anomalías en la VV son menos sensibles al proceso de urbanización en la zona media que en zona norte. En la variable TMín., estas suelen ser ligeramente menores en la zona norte que en la zona media. Posiblemente debido a gradientes altitudinales diferentes, por lo que el análisis de anomalías es mucho más preciso que los valores reportados en las tablas 13 y 14 para su correcta interpretación de manera local.

Tabla 13. Métricas de evaluación de los puntos de monitoreo de las variables climáticas seleccionadas en las tierras bajas zona media para el proceso de urbanización.

Tierras Bajas de la Zona Media								
Variables	HR	VV	TMed.	TMáx.	TMín.	Albedo NIR	Albedo VIS	NDVI
P05	58.87	0.55	12.95	17.45	0.35	0.15	0.03	0.34
Q1	61.69	0.61	21.05	24.15	1.55	0.19	0.04	0.56
Mediana	63.32	0.66	21.95	25.55	2.35	0.20	0.05	0.67
Q3	65.10	0.73	22.65	26.05	3.17	0.21	0.05	0.72
P95	68.25	3.32	23.45	26.95	8.95	0.23	0.08	0.79

HR: humedad relativa [%], VV: velocidad del viento [m/s], TMáx.: temperatura máxima [°C], TMín.: temperatura mínima [°C], Albedo NIR: albedo del infrarrojo cercano, Albedo VIS: albedo visible, y NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada.

En término del albedo tanto NIR y VIS, debido a la baja densidad urbana de las zonas urbanizadas, sus variaciones no resultan ser relevantes. Este argumento se confirma con los elevados valores de NDVI reportados para el caso de urbanización en las tierras bajas zona norte y medio lo que pone de manifiesto la presencia de elementos/áreas fotosintéticamente dispersas dentro del entramado urbano. Aspecto de gran importancia para la evaluación de la sostenibilidad del crecimiento urbano en esta zona del país.

3.4 Discusión

Una de las principales causas del cambio climático global actual son las modificaciones en la CUS. Existen estudios numéricos y experimentales que aseguran que el clima regional se altera si por ejemplo se deforesta a gran escala, repercutiendo en alteraciones de variables como la temperatura superficial, albedo y el flujo de calor sensible que aumentan y se observa una reducción de la humedad y la evapotranspiración [84–86]. En vista de lo anterior, el presente estudio contribuye en mejorar la comprensión del cambio del clima en variables como la HR, VV, TMed., TMáx., TMín., y en otras variables asociadas como el Albedo NIR, Albedo VIS, y NDVI. En los efectos se incrementan desde la escala local, pasando por la escala regional, y posteriormente contribuyendo con los cambios climáticos a escala global [87–89]. Basado en los resultados de las investigaciones anteriores, que son seis ejemplos destacados en el campo de la investigación de la relación existente entre el CUS y las alteraciones en las variables climáticas locales, los hallazgos de este estudio refuerzan los efectos adversos en el clima que se han logrado puntualmente con el proceso de expansión agrícola y la expansión urbana en la Amazonía ecuatoriana. Esta zona presenta una diversidad de ecosistemas que hace que sus variaciones resulten diversas y complejas, frente a los dos procesos de CUS.

Las variaciones de cada parche o punto considerado suelen tener evolución temporal distinta, condiciones locales diferentes y atribuir un cambio local de forma generalizada podría incurrir en errores para la gestión territorial. El hecho de agrupar las variaciones por zonas resulta de interés desde el punto de vista de la contribución local hacia efectos regionales [90,91]. Este aspecto es de gran relevancia entre tomadores de decisión, ya que la planificación en un sistema político centralista es compatible en este sentido para la toma de decisiones [92]. Muchas de las decisiones con relación a la mitigación del cambio climático obedecen a mesas intersectoriales, donde diversos intereses particulares y colectivos son valorados. Diversos entes territoriales y ministerios se involucran y deben tomar decisiones regulatorias sobre territorios con posibilidad administrativa, estas son las provincias en el caso de Ecuador.

La visualización de las variaciones simultáneamente de variables climáticas para la priorización es un factor común de discusión dentro de los grupos de decisión [93,94]. Pocas herramientas como los mapas de calor son utilizados en este ámbito de la toma de decisiones. Esta estrategia de visualización debe estar acompañada de reporte puntuales con el fin de profundizar en casos particulares. Sin embargo, las decisiones no se toman sobre estos casos y los mapas de calor a escala territorial toman especial interés en el momento de direccionar fondos o asignar presupuestos.

Algunos técnicos, resultan ser muy críticos con la información disponible. Especialmente con aquella derivada de sensores remotos. Puesto que su validez y rigor técnico genera rechazo por ausencia de las mediciones in situ. Algunos estudios [95,96] señalan que a pesar de las imprecisiones que se puedan dar respecto a la diferencia entre datos de campo y los datos de sensores remotos, el análisis temporal y los métodos empleado para establecer anomalías se muestran como una alternativa fiable para entender la variabilidad espacial y temporal con mayor rigor que campañas puntuales y/o complejas y costosas redes de monitoreo. La información derivada de sensores remotos es complementaria siempre y cuando exista información de referencia. Normalmente las redes de estaciones meteorológicas están ubicadas en zonas donde no existe cambio de CUS. Esto son zonas urbanas consolidadas, dada las facilidades de acceso y vigilancia de la estación, zonas protegidas, aeropuertos, instituciones públicas y/o privadas como universidades, hospitales, centro de enseñanza, etc. Por lo que poder disponer de información climática en zonas de cambio de uso y cobertura de suelo es una tarea de gran dificultad justamente por presentar condiciones escasas de acceso y/o seguridad. Por lo que los sensores remotos son de particular interés en este aspecto [97,98]. Son una herramienta fundamental para la realización de estudios con el propósito de evaluar las variaciones temporales del clima.

El análisis de las variaciones empleando un indicador generalizado como el z-score facilita la identificación de los puntos temporales de cambio de CUS [99]. Lo que refina incluso la intensidad de los cambios de cobertura de CUS cuando existen mapas de cobertura y uso del suelo muy distantes en el tiempo. Las variaciones resultantes suelen estar acompañadas de anomalías muy positivas o negativas incluso superiores a ± 1.0 . Con frecuencia las variables aerodinámicas como HR, VV, y temperaturas suelen tener una relación importante que da cuenta de algún tipo de modificación en el territorio, y/o del ecosistema. Poder vincular esta con el albedo VIS, NIR y NDVI son una herramienta de gran interés especialmente para valorar el impacto del cambio en la vegetación. Esta situación es evidente en cuanto al cambio de zona con vegetación a una zona urbanizada.

La percepción técnica de la dinámica de las variables del cambio climático local es muy importante, ya que algunas características locales del medio biofísico podrían llegar a ser dispares con lo sucedido en la realidad. Incluso, pueden ser de gran interés para poder entender los efectos regionales y globales debidos al CUS. Este podría ser el caso de eventos regionales que influyen en la variación climática local como es el caso del fenómeno de El Niño por sus siglas en inglés – ENSO o el fenómeno de la Niña, en los que provocan estacionalmente variaciones climáticas importantes. En el caso de este estudio los z-score muy raros superiores a $> \pm 2.0$ en su mayoría están asociados con los eventos regionales antes mencionados. El presente estudio empleó todos los años entre 2000 y 2018, sean años neutros, con fenómeno de la Niña, o fenómeno de El Niño. Su efecto se evidencia en los resultados de los mapas de calor de las Figura 6 y Figura 7. El uso de la metodología del z-score facilita la comparación de las variaciones con respecto al mismo sitio geográfico y eventos regionales, antes y después de sucediso el CUS, por lo que no es necesario comparar con otros puntos circundantes sin CUS. Si bien es posible realizar este análisis de vecindad por persistencia de cobertura y uso del suelo, no es necesario ya que la persistencia dentro de la escala temporal ya está incluida dentro de la serie y su comparación es intrínseca al uso del z-score.

La percepción local es fundamental para relacionar los efectos espaciales y temporales dado el CUS [100,101]. Incluso estos son las explicaciones que contribuyen de manera regional al cambio global. Sin las percepciones no sería posible valorar los efectos, ni las posibles relaciones entre ellas y el cambio por lo que construir de manera conjunta entre actores locales la Tabla 2 de este trabajo llegaría a ser un ejercicio vinculante para todos los actores locales y concienciación.

La mayor preocupación en cuanto a la dinámica de las variables climáticas locales dado un CUS es fundamentalmente la temperatura, ya que es un variable sensible para el ser humano en sus necesidades básicas. Se estudian con frecuencia las variaciones de la temperatura media y máxima. Hoy en día es muy relevante igualmente el estudio de la temperatura mínima que genera efectos adversos en los ecosistemas y en las poblaciones. La disminución de la precipitación es otro de los efectos climáticos adversos, sin embargo, la precipitación es un proceso que depende de factores regionales, en los que la contribución local es relevante, pero los efectos pueden no serlo de la misma manera. Sin embargo, la HR y la evapotranspiración son relevantes en términos locales y pueden afectar tanto el ecosistema como el intercambio gaseoso con la atmósfera. El albedo y el NDVI sin ser variables climáticas, son variables asociadas que permiten confirmar la percepción de los efectos adyacentes provocados por el CUS. El albedo superficial tiene una repercusión importante en el cambio climático porque tiene un papel de

controlar el balance energético [102]. De momento son pocos los estudios que involucran estas variables asociadas. Incluso en algunos estudios las variables podrían no ser biofísico y podrían ser sociales y/o económicas [103,104].

La expansión agrícola, es uno de los principales CUS en la sociedad actual, el aumento demográfico ejerce presiones importantes para el aprovisionamiento alimentario y energético. Los efectos del cambio de cobertura de zonas naturales a zonas gestionadas por el hombre en agricultura y ganadería suponen un serio problema en el ecosistema a pesar de conservar la vegetación como cobertura principal del suelo. En el caso de la urbanización, que son espacios construidos se forma lo que se conoce como las islas de calor urbano donde está comprobado que los niveles de variables como la temperatura y el albedo se ven modificados siendo ello una muestra de que el cambio de cobertura de suelo afecta el clima local y regional [105–107].

En la Amazonía del Ecuador, no existen estudios relevantes que evalúen puntualmente los CUS y su relación de cambio simultáneamente con diversas variables climáticas y asociadas que faciliten la comprensión de los procesos territoriales. Este trabajo se muestra como una alternativa al análisis debido a la ausencia de datos de climáticos de campo. La metodología desarrollada en el presente trabajo LCV-LULCC consigue integrar aspectos relevantes del CUS con la variación climática de manera temporal para valorar los efectos que se han generado en distintas zonas de la Amazonía Ecuatoriana. Queda abierta la posibilidad de incrementar los análisis puntuales por zonas y su relación con los actores locales. En este sentido las medidas de mitigación podrían llegar a ser mejor diseñadas y su implementación generar una mejor acogida y efectividad a escala local.

3.5 Limitaciones

3.5.1 Incertidumbres asociadas a las transiciones

La información oficial del MAATE se encuentra desactualizada, no existe mapas de uso y cobertura de suelo de años superiores a la del año 2018 es decir hace seis años atrás, de igual manera expresar que la resolución espacial es de 1 km lo cual no muestra la realidad de la región biogeográfica de la amazonia ecuatoriana donde actualmente ya existen minifundios y propiedades menores de 1 ha que sufren procesos de conversión de cobertura que no es visualizada en resoluciones más gruesas como la utilizada. También existen errores de digitalización y geo procesos cartográficos donde los polígonos presentan problemas en sus vértices y necesitan una corrección de geometrías que conllevan a cambios que no corresponden a la situación actual.

3.5.2 Efecto de la temporalidad del análisis

Basado en las recomendaciones de dos niveles (serie corta y serie larga) de 2019, de la Organización Meteorológica Mundial para el análisis de referencia climático se debería tener una temporalidad mínima de 30 años [108] para lograr la representatividad y la confiabilidad de los resultados. Para el presente estudio se usaron únicamente 19 años debido a que no existía información de cambio de CUS con ese rango necesario, el nivel de serie corta si se cumple con el nivel de análisis planteado. Aunque la metodología LCV-LULCC, se aplicó al nivel de serie corta, con los datos disponibles es posible extenderlo a al nivel de serie largo. Las temporalidades de cada una de las variables también tienen efectos importantes en los resultados alcanzados ya que por ejemplo la temperatura presenta una variación diaria muy significativa la cual al tomar únicamente datos mensuales se pierde en el proceso y no se puede identificar el verdadero comportamiento de la variable. Así mismo para con el NDVI donde la reflectancia del satélite por la resolución tan gruesa que tiene puede tener recepciones de onda diferente a la real, es decir, zonas de pastizales podrían confundirse con zonas de vegetación arbustiva juveniles o en proceso de formación. Sin embargo, se pudo corroborar los resultados encontrados con la literatura e investigaciones previas de otros actores.

3.6 Conclusiones

La metodología planteada LCV-LULCC desarrollada permitió mejorar la comprensión de los efectos del cambio climático local debido al CUS en términos de su magnitud y la propagación de estos en el territorio al integrar distintas zonas diferenciadas geográficamente en la Amazonía ecuatoriana. Además, se evaluaron distintas variables climáticas y asociadas para evaluar el estado de la variación climática local reciente asociada a los procesos de expansión de centros poblados e intensificación y rotación agrícola. La metodología permitió analizar todas las combinaciones de situaciones previo y posterior al cambio de CUS en distintos ambientes, altitudes, y situaciones locales donde ha ocurrido tanto la expansión agrícola como la urbanización en la Amazonía Ecuatoriana. A continuación, se describen los principales hallazgos que refuerzan la metodología desarrollada.

- El estudio contribuye a mejorar la comprensión del cambio climático, analizando variables como HR, VV, temperatura, albedo, y NDVI. Estos cambios climáticos locales escalan hacia efectos regionales y globales, afectando tanto el medio ambiente como la planificación territorial a largo plazo.

- Las variaciones climáticas en la Amazonía ecuatoriana, debido a la expansión agrícola y urbana, revelan que las decisiones locales sobre el territorio pueden tener efectos climáticos regionales y globales. Gestionar estos cambios requiere una planificación integral basada en el análisis climático.
- Agrupar las variaciones climáticas por zonas facilita la comprensión de cómo los cambios locales contribuyen a efectos climáticos regionales. Este enfoque es esencial para tomadores de decisiones, especialmente en sistemas centralistas que buscan armonizar intereses locales y regionales.
- Los mapas de calor, como herramientas de visualización climática, apoyan la toma de decisiones sobre la asignación de fondos y recursos. Sin embargo, estas herramientas necesitan ser complementadas con reportes detallados para mejorar la precisión y profundidad en los análisis territoriales.
- Los sensores remotos, a pesar de sus imprecisiones, son útiles para analizar las variaciones climáticas temporales en zonas de difícil acceso. Complementan los datos in situ, especialmente en áreas donde el cambio en la CUS afecta el ecosistema local.
- El uso del z-score en el análisis de las variaciones climáticas ayuda a identificar puntos críticos de cambio en el uso de suelo. Esto refina la comprensión de cómo la expansión agrícola o urbana influye en variables como HR, VV, temperatura y el albedo.
- Las variaciones climáticas locales, como la temperatura y la HR, son clave para comprender los efectos del cambio en la cobertura de suelo. Estos cambios, visibles en las anomalías del albedo y NDVI, impactan tanto en los ecosistemas como en el clima regional.
- La percepción local sobre la dinámica de las variables climáticas es crucial para conectar los efectos locales con los cambios climáticos regionales y globales. La colaboración entre actores locales es fundamental para diseñar estrategias de mitigación más efectivas.
- La urbanización y la expansión agrícola generan islas de calor urbano y alteraciones en el clima local y regional. Este fenómeno, visible en la Amazonía ecuatoriana, demuestra la importancia de estudiar el cambio climático a través de variables climáticas y su relación con el uso del suelo.

3.7 Bibliográfia

1. Chaudhary, A.; Burivalova, Z.; Koh, L.P.; Hellweg, S. Impact of Forest Management on Species Richness: Global Meta-Analysis and Economic Trade-Offs. *Sci. Rep.* **2016**, *6*, 23954, doi:10.1038/srep23954.
2. Newbold, T.; Hudson, L.N.; Hill, S.L.L.; Contu, S.; Lysenko, I.; Senior, R.A.; Börger, L.; Bennett, D.J.; Choimes, A.; Collen, B.; et al. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature* **2015**, *520*, 45–50, doi:10.1038/nature14324.
3. Tran, D.X.; Pla, F.; Latorre-Carmona, P.; Myint, S.W.; Caetano, M.; Kieu, H. V Characterizing the relationship between land use land cover change and land surface temperature. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2017**, *124*, 119–132, doi:https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.01.001.
4. Popp, A.; Humpenöder, F.; Weindl, I.; Bodirsky, B.L.; Bonsch, M.; Lotze-Campen, H.; Müller, C.; Biewald, A.; Rolinski, S.; Stevanovic, M.; et al. Land-use protection for climate change mitigation. *Nat. Clim. Chang.* **2014**, *4*, 1095–1098, doi:10.1038/nclimate2444.
5. Tolessa, T.; Senbeta, F.; Kidane, M. Landscape composition and configuration in the central highlands of Ethiopia. *Ecol. Evol.* **2016**, *6*, 7409–7421, doi:https://doi.org/10.1002/ece3.2477.
6. Urgilez-Clavijo, A.; de la Riva, J.; Rivas-Tabares, D.A.; Tarquis, A.M. Linking deforestation patterns to soil types: A multifractal approach. *Eur. J. Soil Sci.* **2021**, *72*, 635–655, doi:https://doi.org/10.1111/ejss.13032.
7. Arowolo, A.O.; Deng, X.; Olatunji, O.A.; Obayelu, A.E. Assessing changes in the value of ecosystem services in response to land-use/land-cover dynamics in Nigeria. *Sci. Total Environ.* **2018**, *636*, 597–609, doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.277.
8. Adhikari, K.; Hartemink, A.E. Linking soils to ecosystem services — A global review. *Geoderma* **2016**, *262*, 101–111, doi:https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009.
9. Weiskopf, S.R.; Rubenstein, M.A.; Crozier, L.G.; Gaichas, S.; Griffis, R.; Halofsky, J.E.; Hyde, K.J.W.; Morelli, T.L.; Morissette, J.T.; Muñoz, R.C.; et al. Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Sci. Total Environ.* **2020**, *733*, 137782, doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137782.
10. Thornton, P.K.; Ericksen, P.J.; Herrero, M.; Challinor, A.J. Climate variability and vulnerability to climate change: a review. *Glob. Chang. Biol.* **2014**, *20*, 3313–3328, doi:https://doi.org/10.1111/gcb.12581.
11. Magonong, B.P.; Twine, W.; Feig, G.T.; Van der Merwe, H.; Fisher, J.T. Influences of Climate Variability on Land Use and Land Cover Change in Rural South Africa. *Remote Sens.* **2024**, *16*.
12. Clerici, N.; Cote-Navarro, F.; Escobedo, F.J.; Rubiano, K.; Villegas, J.C. Spatio-temporal and cumulative effects of land use-land cover and climate change on two ecosystem services in the Colombian Andes. *Sci. Total Environ.* **2019**, *685*, 1181–1192, doi:10.1016/J.SCITOTENV.2019.06.275.
13. Peters, M.K.; Hemp, A.; Appelhans, T.; Becker, J.N.; Behler, C.; Classen, A.; Detsch, F.; Ensslin, A.; Ferger, S.W.; Frederiksen, S.B.; et al. Climate–land-use interactions shape tropical mountain

- biodiversity and ecosystem functions. *Nat.* 2019 5687750 **2019**, 568, 88–92, doi:10.1038/s41586-019-1048-z.
14. Winkler, K.; Fuchs, R.; Rounsevell, M.; Herold, M. Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nat. Commun.* **2021**, 12, 2501, doi:10.1038/s41467-021-22702-2.
 15. Global Forest Watch Global deforestation Available online: <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/global/> (accessed on Jan 17, 2024).
 16. Gash, J.H.C.; Nobre, C.A. Climatic Effects of Amazonian Deforestation: Some Results from ABRACOS. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **1997**, 78, 823–830, doi:https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0823:CEOADS>2.0.CO;2.
 17. Calvet, J.-C.; Santos-Alvalá, R.; Jaubert, G.; Delire, C.; Nobre, C.; Wright, I.; Noilhan, J. Mapping Surface Parameters for Mesoscale Modeling in Forested and Deforested Southwestern Amazonia. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **1997**, 78, 413–424, doi:https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0413:MSPRMM>2.0.CO;2.
 18. Dubreuil, V.; Debortoli, N.; Funatsu, B.; Nédélec, V.; Durieux, L. Impact of land-cover change in the Southern Amazonia climate: a case study for the region of Alta Floresta, Mato Grosso, Brazil. *Environ. Monit. Assess.* **2012**, 184, 877–891, doi:10.1007/s10661-011-2006-x.
 19. Chapman, S.; Watson, J.E.M.; Salazar, A.; Thatcher, M.; McAlpine, C.A. The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. *Landsc. Ecol.* **2017**, 32, 1921–1935, doi:10.1007/s10980-017-0561-4.
 20. Ju, X.; Li, W.; Li, J.; He, L.; Mao, J.; Han, L. Future climate change and urban growth together affect surface runoff in a large-scale urban agglomeration. *Sustain. Cities Soc.* **2023**, 99, 104970, doi:https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104970.
 21. Duckworth, F.S.; Sandberg, J.S. The Effect of Cities upon Horizontal and Vertical Temperature Gradients. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **1954**, 35, 198–207, doi:https://doi.org/10.1175/1520-0477-35.5.198.
 22. Romero-Lankao, P.; Gurney, K.R.; Seto, K.C.; Chester, M.; Duren, R.M.; Hughes, S.; Hutyra, L.R.; Marcotullio, P.; Baker, L.; Grimm, N.B.; et al. A critical knowledge pathway to low-carbon, sustainable futures: Integrated understanding of urbanization, urban areas, and carbon. *Earth's Futur.* **2014**, 2, 515–532, doi:https://doi.org/10.1002/2014EF000258.
 23. Salazar, A.; Baldi, G.; Hirota, M.; Syktus, J.; McAlpine, C. Land use and land cover change impacts on the regional climate of non-Amazonian South America: A review. *Glob. Planet. Change* **2015**, 128, 103–119, doi:10.1016/j.gloplacha.2015.02.009.
 24. Longobardi, P.; Montenegro, A.; Beltrami, H.; Eby, M. Deforestation induced climate change: Effects of spatial scale. *PLoS One* **2016**, 11, e0153357.
 25. Drimeyer, P.A.; Shukla, J. Albedo as a modulator of climate response to tropical deforestation. *J. Geophys. Res. Atmos.* **1994**, 99, 20863–20877, doi:https://doi.org/10.1029/94JD01311.
 26. Zhao, F.; Lan, X.; Li, W.; Zhu, W.; Li, T. Influence of Land Use Change on the Surface Albedo and Climate Change in the Qinling-Daba Mountains. *Sustainability* 2021, 13.
 27. Li, Y.; Chen, Y.; Li, Z. Effects of land use and cover change on surface wind speed in China. *J. Arid*

- Land* **2019**, *11*, 345–356, doi:10.1007/s40333-019-0095-5.
28. Li, J.; Zheng, X.; Zhang, C.; Chen, Y. Impact of Land-Use and Land-Cover Change on Meteorology in the Beijing–Tianjin–Hebei Region from 1990 to 2010. *Sustainability* **2018**, *10*.
 29. Ngarambe, J.; Oh, J.W.; Su, M.A.; Santamouris, M.; Yun, G.Y. Influences of wind speed, sky conditions, land use and land cover characteristics on the magnitude of the urban heat island in Seoul: An exploratory analysis. *Sustain. Cities Soc.* **2021**, *71*, 102953, doi:https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102953.
 30. Idrissou, M.; Diekkrüger, B.; Tischbein, B.; Op de Hipt, F.; Näschen, K.; Poméon, T.; Yira, Y.; Ibrahim, B. Modeling the Impact of Climate and Land Use/Land Cover Change on Water Availability in an Inland Valley Catchment in Burkina Faso. *Hydrology* **2022**, *9*.
 31. Barati, A.A.; Zhoolideh, M.; Azadi, H.; Lee, J.-H.; Scheffran, J. Interactions of land-use cover and climate change at global level: How to mitigate the environmental risks and warming effects. *Ecol. Indic.* **2023**, *146*, 109829, doi:https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109829.
 32. MAPBIOMAS Estadísticas MAPBIOMAS Available online: <https://amazonia.mapbiomas.org/estadisticas/> (accessed on Feb 12, 2024).
 33. Laforteza, R.; Chen, J. The provision of ecosystem services in response to global change: Evidences and applications. *Environ. Res.* **2016**, *147*, 576–579, doi:https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.02.018.
 34. Wedding, L.M.; Reiter, S.; Moritsch, M.; Hartge, E.; Reiblich, J.; Gourlie, D.; Guerry, A. Embedding the value of coastal ecosystem services into climate change adaptation planning. *PeerJ* **2022**, *10*, e13463.
 35. Cisneros Vidales, A.A.; Barriga Albuja, V.M. Oil exploitation in Yasuni biosphere reserve. Impact on Ecuador's commitment with sustainability BT - sustainable development research and practice in Mexico and selected Latin American countries. In; Leal Filho, W., Noyola-Cherpitel, R., Medellín-Milán, P., Ruiz Vargas, V., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2018; pp. 167–183 ISBN 978-3-319-70560-6.
 36. Allen, J.C.; Barnes, D.F. The causes of deforestation in developing countries. *Ann. Assoc. Am. Geogr.* **1985**, *75*, 163–184, doi:https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1985.tb00079.x.
 37. Sierra, R.; Calva, O.; Guevara, A. *La deforestación en el Ecuador, 1990-2018. Factores promotores y tendencias recientes*; Quito, Ecuador, 2021;
 38. Prochazka, P.; Abrham, J.; Cerveny, J.; Kobera, L.; Sanova, P.; Benes, D.; Fink, J.-M.; Jiraskova, E.; Primasova, S.; Soukupova, J.; et al. Understanding the socio-economic causes of deforestation: a global perspective. *Front. For. Glob. Chang.* **2023**, *6*, doi:10.3389/ffgc.2023.1288365.
 39. Thanvisitthpon, N.; Nakburee, A.; Khamchiangta, D.; Saguansap, V. Climate change-induced urban heat Island trend projection and land surface temperature: A case study of Thailand's Bangkok metropolitan. *Urban Clim.* **2023**, *49*, 101484, doi:https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101484.
 40. Dee, S.; Bailey, A.; Conroy, J.L.; Atwood, A.; Stevenson, S.; Nusbaumer, J.; Noone, D. Water isotopes, climate variability, and the hydrological cycle: recent advances and new frontiers. *Environ. Res. Clim.* **2023**, *2*, 22002, doi:10.1088/2752-5295/acbe1.

41. Khan, S.U.; Sheikh, M.R.; Dimen, L.; Batool, H.; Abbas, A.; Nuta, A.C. Nexus between health poverty and climatic variability in Pakistan: a geospatial analysis. *Front. Environ. Sci.* **2023**, *11*, doi:10.3389/fenvs.2023.1180556.
42. Smith, I.A.; Fabian, M.P.; Hutyra, L.R. Urban green space and albedo impacts on surface temperature across seven United States cities. *Sci. Total Environ.* **2023**, *857*, 159663, doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159663.
43. Fayech, D.; Tarhouni, J. Climate variability and its effect on normalized difference vegetation index (NDVI) using remote sensing in semi-arid area. *Model. Earth Syst. Environ.* **2021**, *7*, 1667–1682, doi:10.1007/s40808-020-00896-6.
44. Mašek, J.; Tumajer, J.; Lange, J.; Kaczka, R.; Fišer, P.; Tremml, V. Variability in tree-ring width and NDVI responses to climate at a landscape level. *Ecosystems* **2023**, *26*, 1144–1157, doi:10.1007/s10021-023-00822-8.
45. Criado, M.; Santos-Francés, F.; Martínez-Graña, A.; Sánchez, Y.; Merchán, L. Multitemporal analysis of soil sealing and land use changes linked to urban expansion of Salamanca (Spain) using Landsat images and soil carbon management as a mitigating tool for climate change. *Remote Sens.* **2020**, *12*.
46. Halder, B.; Bandyopadhyay, J.; Banik, P. Evaluation of the climate change impact on urban heat island based on land surface temperature and geospatial indicators. *Int. J. Environ. Res.* **2021**, *15*, 819–835, doi:10.1007/s41742-021-00356-8.
47. Yao, R.; Wang, L.; Huang, X.; Gong, W.; Xia, X. Greening in rural areas increases the surface urban heat island intensity. *Geophys. Res. Lett.* **2019**, *46*, 2204–2212, doi:https://doi.org/10.1029/2018GL081816.
48. Zhang, P.; Li, Y.; Jing, W.; Yang, D.; Zhang, Y.; Liu, Y.; Geng, W.; Rong, T.; Shao, J.; Yang, J.; et al. Comprehensive assessment of the effect of urban built-up land expansion and climate change on net primary productivity. *Complexity* **2020**, *2020*, 8489025, doi:10.1155/2020/8489025.
49. Reice, S.R. Environmental patchiness and the breakdown of leaf litter in a woodland stream. *Ecology* **1974**, *55*, 1271–1282, doi:https://doi.org/10.2307/1935455.
50. Bikeko, S.S.; E., V. Land use land cover change as a casual factor for climate variability and trends in the Bilate Watershed, Ethiopia. *Environ. Monit. Assess.* **2024**, *196*, 1250, doi:10.1007/s10661-024-13435-y.
51. Alemayehu, Z.Y.; Minale, A.S.; Legesse, S.A. Land-use and land-cover dynamics nexus to local climate variability in Suha watershed, upper Blue Nile basin, Northwest Ethiopia. *Sustain. Environ.* **2023**, *9*, 2278828, doi:10.1080/27658511.2023.2278828.
52. Staal, A.; Flores, B.M.; Aguiar, A.P.D.; Bosmans, J.H.C.; Fetzer, I.; Tuinenburg, O.A. Feedback between drought and deforestation in the Amazon. *Environ. Res. Lett.* **2020**, *15*, 44024, doi:10.1088/1748-9326/ab738e.
53. RAISG Amazonía en números. Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada Available online: <https://www.raisg.org/es/>.
54. Bilsborrow, R.E.; Barbieri, A.F.; Pan, W. Changes in population and land use over time in the Ecuadorian Amazon. *Acta Amaz.* **2004**, *34*.

55. Caballero-Serrano, V.; Alday, J.G.; Amigo, J.; Caballero, D.; Carrasco, J.C.; McLaren, B.; Onaindia, M. Social Perceptions of Biodiversity and Ecosystem Services in the Ecuadorian Amazon. *Hum. Ecol.* **2017**, *45*, 475–486, doi:10.1007/s10745-017-9921-6.
56. MAATE Areas Protegidas Ecuador. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. **2022**.
57. MAATE Plan nacional de riego y drenaje 2021-2026. *Minist. del Ambient. Agua y Transición Ecológica* **2021**, 60.
58. Cristóbal, A.C. Oil palm expansion in Ecuador under the Green Revolution paradigm (1961-2021). *Hist. Agrar.* **2023**, *23*, 191–221, doi:10.26882/histagrar.091e08c.
59. Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE). *Análisis de la deforestación en el Ecuador Continental 1990 - 2014*; Ministerio del Ambiente del Ecuador: Quito, Ecuador, 2016;
60. MAE Deforestación del Ecuador Continental Periodo 2014-2016. *Minist. del Ambient. del Ecuador* **2017**, 38.
61. Sun, R.; Lü, Y.; Yang, X.; Chen, L. Understanding the variability of urban heat islands from local background climate and urbanization. *J. Clean. Prod.* **2019**, *208*, 743–752, doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.178.
62. Dunjić, J.; Milošević, D.; Kojić, M.; Savić, S.; Lužanin, Z.; Šećerov, I.; Arsenović, D. Air humidity characteristics in “local climate zones” of Novi Sad (Serbia) based on long-term data. *ISPRS Int. J. Geo-Information* **2021**, *10*.
63. Trlica, A.; Hutyra, L.R.; Schaaf, C.L.; Erb, A.; Wang, J.A. Albedo, land cover, and daytime surface temperature variation across an urbanized landscape. *Earth's Futur.* **2017**, *5*, 1084–1101, doi:https://doi.org/10.1002/2017EF000569.
64. Shang, J.; Zhang, Y.; Peng, Y.; Huang, Y.; Zhu, L.; Wu, Z.; Wang, J.; Cui, Y. Climate change drives NDVI variations at multiple spatiotemporal levels rather than human disturbance in Northwest China. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2022**, *29*, 13782–13796, doi:10.1007/s11356-021-16774-2.
65. Li, D.; Wu, S.; Liang, Z.; Li, S. The impacts of urbanization and climate change on urban vegetation dynamics in China. *Urban For. Urban Green.* **2020**, *54*, 126764, doi:https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126764.
66. Blackmore, I.; Rivera, C.; Waters, W.F.; Iannotti, L.; Lesorogol, C. The impact of seasonality and climate variability on livelihood security in the Ecuadorian Andes. *Clim. Risk Manag.* **2021**, *32*, 100279, doi:https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100279.
67. Beltrán-Tolosa, L.M.; Navarro-Racines, C.; Pradhan, P.; Cruz-García, G.S.; Solís, R.; Quintero, M. Action needed for staple crops in the Andean-Amazon foothills because of climate change. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.* **2020**, *25*, 1103–1127, doi:10.1007/s11027-020-09923-4.
68. Llopart, M.; Reboita, M.S.; Coppola, E.; Giorgi, F.; Da Rocha, R.P.; De Souza, D.O. Land use change over the Amazon forest and its impact on the local climate. *Water* **2018**, *10*.
69. Karger, D.N.; Conrad, O.; Böhrner, J.; Kawohl, T.; Kreft, H.; Soria-Auza, R.W.; Zimmermann, N.E.; Linder, H.P.; Kessler, M. Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Sci. Data* **2017**, *4*, 170122, doi:10.1038/sdata.2017.122.
70. Brun, P.; Zimmermann, N.E.; Hari, C.; Pellissier, L.; Karger, D.N. Global climate-related predictors

- at kilometer resolution for the past and future. *Earth Syst. Sci. Data* **2022**, *14*, 5573–5603, doi:10.5194/essd-14-5573-2022.
71. Pavani, G.; Chandrasekar, A. Impact of enhanced forest conditions on land surface characteristics over central India using LIS. *Theor. Appl. Climatol.* **2022**, *149*, 437–449, doi:10.1007/s00704-022-04020-9.
 72. Manciu, A.; Rammig, A.; Krause, A.; Quesada, B.R. Impacts of land cover changes and global warming on climate in Colombia during ENSO events. *Clim. Dyn.* **2023**, *61*, 111–129, doi:10.1007/s00382-022-06545-1.
 73. Stephens, G.L.; O'Brien, D.; Webster, P.J.; Pilewski, P.; Kato, S.; Li, J. The albedo of Earth. *Rev. Geophys.* **2015**, *53*, 141–163, doi:https://doi.org/10.1002/2014RG000449.
 74. Goode, P.R.; Qiu, J.; Yurchyshyn, V.; Hickey, J.; Chu, M.-C.; Kolbe, E.; Brown, C.T.; Koonin, S.E. Earthshine observations of the Earth's reflectance. *Geophys. Res. Lett.* **2001**, *28*, 1671–1674, doi:https://doi.org/10.1029/2000GL012580.
 75. Weisstein, E. Eric Weisstein's World of Physics Available online: <https://scienceworld.wolfram.com/physics/Albedo.html> (accessed on Nov 6, 2023).
 76. Kriegler, F. ~J.; Malila, W. ~A.; Nalepka, R. ~F.; Richardson, W. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. In Proceedings of the Remote Sensing of Environment, VI; 1969; p. 97.
 77. Huang, S.; Tang, L.; Hupy, J.P.; Wang, Y.; Shao, G. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *J. For. Res.* **2021**, *32*, 1–6, doi:10.1007/s11676-020-01155-1.
 78. QGIS.org QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project 2023.
 79. Eastman, J.R. TerrSet: Geospatial Monitoring and Modeling Software. *Clark Labs, Clark Univ.* 2015.
 80. Huo, X.; Zhou, C.; Xu, Y.; Li, M. A methodology for balancing the preservation of area, shape, and topological properties in polygon-to-raster conversion. *Cartogr. Geogr. Inf. Sci.* **2022**, *49*, 115–133, doi:10.1080/15230406.2021.1991478.
 81. Savitzky, A.; Golay, M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Anal. Chem.* **1964**, *36*, 1627–1639, doi:10.1021/ac60214a047.
 82. Rousseeuw, P.J.; Hubert, M. Anomaly detection by robust statistics. *Wiley Interdiscip. Rev. Data Min. Knowl. Discov.* **2018**, *8*, 1–14, doi:10.1002/widm.1236.
 83. León-Tavares, J.; Roujean, J.-L.; Smets, B.; Wolters, E.; Toté, C.; Swinnen, E. Correction of Directional Effects in VEGETATION NDVI Time-Series. *Remote Sens.* 2021, *13*.
 84. Foley, J.A.; Levis, S.; Costa, M.H.; Cramer, W.; Pollard, D. Incorporating Dynamic Vegetation Cover within Global Climate Models. *Ecol. Appl.* **2000**, *10*, 1620–1632, doi:10.2307/2641227.
 85. Laforteza, R.; Chen, J.; van den Bosch, C.K.; Randrup, T.B. Nature-based solutions for resilient landscapes and cities. *Environ. Res.* **2018**, *165*, 431–441, doi:https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.038.

86. Malhi, Y.; Lander, T.; le Roux, E.; Stevens, N.; Macias-Fauria, M.; Wedding, L.; Girardin, C.; Kristensen, J.Å.; Sandom, C.J.; Evans, T.D. The role of large wild animals in climate change mitigation and adaptation. *Curr. Biol.* **2022**, *32*, R181–R196.
87. Allan, R.P.; Barlow, M.; Byrne, M.P.; Cherchi, A.; Douville, H.; Fowler, H.J.; Gan, T.Y.; Pendergrass, A.G.; Rosenfeld, D.; Swann, A.L.S.; et al. Advances in understanding large-scale responses of the water cycle to climate change. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **2020**, *1472*, 49–75, doi:<https://doi.org/10.1111/nyas.14337>.
88. Bütikofer, L.; Anderson, K.; Bebbber, D.P.; Bennie, J.J.; Early, R.I.; Maclean, I.M.D. The problem of scale in predicting biological responses to climate. *Glob. Chang. Biol.* **2020**, *26*, 6657–6666, doi:<https://doi.org/10.1111/gcb.15358>.
89. Sippel, S.; Meinshausen, N.; Fischer, E.M.; Székely, E.; Knutti, R. Climate change now detectable from any single day of weather at global scale. *Nat. Clim. Chang.* **2020**, *10*, 35–41, doi:[10.1038/s41558-019-0666-7](https://doi.org/10.1038/s41558-019-0666-7).
90. Audebert, P.; Milne, E.; Schiettecatte, L.-S.; Dionisio, D.; Sinitambirivoutin, M.; Pais, C.; Proença, C.; Bernoux, M. Ecological zoning for climate policy and global change studies. *Nat. Sustain.* **2024**, *7*, 1294–1303, doi:[10.1038/s41893-024-01416-5](https://doi.org/10.1038/s41893-024-01416-5).
91. Royer-Tardif, S.; Bauhus, J.; Doyon, F.; Nolet, P.; Thiffault, N.; Aubin, I. Revisiting the functional zoning concept under climate change to expand the portfolio of adaptation options. *Forests* **2021**, *12*, doi:[10.3390/f12030273](https://doi.org/10.3390/f12030273).
92. Ostrom, E. A polycentric approach for coping with climate change. *Available SSRN 1934353* **2009**.
93. Gu, Z. Complex heatmap visualization. *iMeta* **2022**, *1*, e43, doi:<https://doi.org/10.1002/imt2.43>.
94. Urribarri, D.K.; Larrea, M.L. A visualization technique to assist in the comparison of large meteorological datasets. *Comput. Graph.* **2022**, *104*, 1–10, doi:<https://doi.org/10.1016/j.cag.2022.02.011>.
95. Wentz, F.J.; Schabel, M. Precise climate monitoring using complementary satellite data sets. *Nature* **2000**, *403*, 414–416, doi:[10.1038/35000184](https://doi.org/10.1038/35000184).
96. Yang, J.; Gong, P.; Fu, R.; Zhang, M.; Chen, J.; Liang, S.; Xu, B.; Shi, J.; Dickinson, R. The role of satellite remote sensing in climate change studies. *Nat. Clim. Chang.* **2013**, *3*, 875–883, doi:[10.1038/nclimate1908](https://doi.org/10.1038/nclimate1908).
97. Venter, Z.S.; Brousse, O.; Esau, I.; Meier, F. Hyperlocal mapping of urban air temperature using remote sensing and crowdsourced weather data. *Remote Sens. Environ.* **2020**, *242*, 111791, doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111791>.
98. Alahacoon, N.; Edirisinghe, M. A comprehensive assessment of remote sensing and traditional based drought monitoring indices at global and regional scale. *Geomatics, Nat. Hazards Risk* **2022**, *13*, 762–799, doi:[10.1080/19475705.2022.2044394](https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2044394).
99. Jamshidi, E.J.; Yusup, Y.; Kayode, J.S.; Kamaruddin, M.A. Detecting outliers in a univariate time series dataset using unsupervised combined statistical methods: A case study on surface water temperature. *Ecol. Inform.* **2022**, *69*, 101672, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101672>.
100. De Longueville, F.; Ozer, P.; Gemenne, F.; Henry, S.; Mertz, O.; Nielsen, J.Ø. Comparing climate

- change perceptions and meteorological data in rural West Africa to improve the understanding of household decisions to migrate. *Clim. Change* **2020**, *160*, 123–141, doi:10.1007/s10584-020-02704-7.
101. de Matos Carlos, S.; da Cunha, D.A.; Pires, M.V.; do Couto-Santos, F.R. Understanding farmers' perceptions and adaptation to climate change: the case of Rio das Contas basin, Brazil. *GeoJournal* **2020**, *85*, 805–821, doi:10.1007/s10708-019-09993-1.
 102. Li, M.; Han, N.; Zhang, X.; Wang, S.; Jiang, M.; Bokhari, A.; Zhang, W.; Race, M.; Shen, Z.; Chen, R.; et al. Perovskite oxide for emerging photo(electro)catalysis in energy and environment. *Environ. Res.* **2022**, *205*, 112544, doi:https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112544.
 103. Barnes, M.L.; Wang, P.; Cinner, J.E.; Graham, N.A.J.; Guerrero, A.M.; Jasny, L.; Lau, J.; Sutcliffe, S.R.; Zamborain-Mason, J. Social determinants of adaptive and transformative responses to climate change. *Nat. Clim. Chang.* **2020**, *10*, 823–828, doi:10.1038/s41558-020-0871-4.
 104. Hoffmann, R.; Muttarak, R.; Peisker, J.; Stanig, P. Climate change experiences raise environmental concerns and promote Green voting. *Nat. Clim. Chang.* **2022**, *12*, 148–155, doi:10.1038/s41558-021-01263-8.
 105. Arnfield, A.J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. Climatol.* **2003**, *23*, 1–26, doi:https://doi.org/10.1002/joc.859.
 106. Intaraksa, A.; Chunkao, K.; Bualert, S. Bowen ratio method for measuring heat transfer on land cover change in establishing green patch in urban heat island of Bangkok. *Mod. Appl. Sci.* **2014**, *8*, 158.
 107. Pielke Sr., R.A.; Pitman, A.; Niyogi, D.; Mahmood, R.; McAlpine, C.; Hossain, F.; Goldewijk, K.K.; Nair, U.; Betts, R.; Fall, S.; et al. Land use/land cover changes and climate: modeling analysis and observational evidence. *WIREs Clim. Chang.* **2011**, *2*, 828–850, doi:https://doi.org/10.1002/wcc.144.
 108. Lief, C.; Wright, W.J.; Baddour, O.; Brunet, M. High-Quality Global Data Management Framework for Climate (HQ-GDMFC). In Proceedings of the AGU Fall Meeting Abstracts; 2019; Vol. 2019, pp. IN11C-0673.