



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA
INDOAMÉRICA**

FACULTAD DE CIENCIAS DEL MEDIO AMBIENTE

CARRERA DE INGENIERÍA EN BIODIVERSIDAD Y RECURSOS GENÉTICOS

TEMA:

**MANEJO DE FIRMAS MULTIESPECTRALES CAPTADAS CON RPAS (SISTEMAS
AÉREOS PILOTADOS DE FORMA REMOTA) PARA LA DIFERENCIACIÓN DE
VEGETACIÓN URBANA EN UN VALLE INTERANDINO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniería en Biodiversidad y Recursos Genéticos

Autor(a)

Villacís Ñacato Zaskya Nataly

Tutor(a)

Ph.D., Bonilla Bedoya Santiago Patricio

QUITO – ECUADOR

2022

**AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL AUTOR PARA LA CONSULTA,
REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL
TRABAJO DE TÍTULACIÓN**


Yo, Zaskya Nataly Villacís Ñacato, declaro ser autor del Trabajo de Titulación con el nombre “Manejo de firmas multiespectrales captadas con RPAS (Sistemas Aéreos Pilotados de Forma Remota) para la diferenciación de vegetación urbana en un valle interandino”, como requisito para optar al grado de Ingeniería en Biodiversidad y Recursos Genéticos y autorizo al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica Indoamérica, para que con fines netamente académicos divulgue esta obra a través del Repositorio Digital Institucional (RDI-UTI).

Los usuarios del RDI-UTI podrán consultar el contenido de este trabajo en las redes de información del país y del exterior, con las cuales la Universidad tenga convenios. La Universidad Tecnológica Indoamérica no se hace responsable por el plagio o copia del contenido parcial o total de este trabajo.

Del mismo modo, acepto que los Derechos de Autor, Morales y Patrimoniales, sobre esta obra, serán compartidos entre mi persona y la Universidad Tecnológica Indoamérica, y que no tramitaré la publicación de esta obra en ningún otro medio, sin autorización expresa de la misma. En caso de que exista el potencial de generación de beneficios económicos o patentes, producto de este trabajo, acepto que se deberán firmar convenios específicos adicionales, donde se acuerden los términos de adjudicación de dichos beneficios.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Quito, a los cinco días del mes de abril de 2022, firmo conforme:

Autor: Zaskya Nataly Villacís Ñacato

Firma: 

Número de Cédula: 1750361139

Dirección: Pichincha, Quito, Comité del pueblo

Correo Electrónico: zaskyavillacis9ehcb@gmail.com

Teléfono: 0998900675

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “MANEJO DE FIRMAS MULTIESPECTRALES CAPTADAS CON RPAS (SISTEMAS AÉREOS PILOTADOS DE FORMA REMOTA) PARA LA DIFERENCIACIÓN DE VEGETACIÓN URBANA EN UN VALLE INTERANDINO” presentado por Zaskya Natalya Villacís Ñacato, para optar por el Título de Ingeniería Biodiversidad y Recursos Genéticos.

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y considero que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del Tribunal Examinador que se designe.

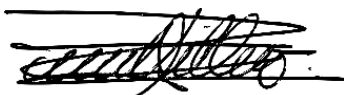
Quito, 08 de marzo del 2022

.....
Ph. D., Santiago Patricio Bonilla Bedoya

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Quien suscribe, declaro que los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, como requerimiento previo para la obtención del Título de Ingeniería en Biodiversidad y Recursos Genéticos, son absolutamente originales, auténticos y personales y de exclusiva responsabilidad legal y académica del autor

Quito, 05 de abril del 2022



.....
Zaskya Nataly Villacís Ñacato
1750361139

APROBACIÓN TRIBUNAL

El trabajo de Titulación ha sido revisado, aprobado y autorizada su impresión y empastado, sobre el Tema: MANEJO DE FIRMAS MULTIESPECTRALES CAPTADAS CON RPAS (SISTEMAS AÉREOS PILOTADOS DE FORMA REMOTA) PARA LA DIFERENCIACIÓN DE VEGETACIÓN URBANA EN UN VALLE INTERANDINO, previo a la obtención del Título de Ingeniería en Biodiversidad y Recursos Genéticos, reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la sustentación del trabajo de titulación.

Quito, 05 de abril de 2022

.....

M. Sc. Zayda Jacqueline Lozano Haro
Lector 1

.....

Ph. D., Laura Inés Salazar Cotugno
Lector 2

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mis padres Jorge y Blanca quienes con su esfuerzo, amor y dedicación me permitieron cumplir una de muchas metas propuestas, porque siempre creyeron en mis esfuerzos y decisiones.

A mi familia que siempre me apoyaron en el transcurso de mi carrera universitaria.

Finalmente, quiero dedicar esta tesis a mis amigos Karen y Jorge por siempre acompañarme en el proceso de estudio, y por brindarme su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a mis padres por todo su apoyo económico y emocional durante mi trayectoria estudiantil para lograr obtener mi título universitario.

Agradezco a mi tutor y profesores universitarios por haberme impartido todos los conocimientos necesarios para llevar a cabo este trabajo y formarme como profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PORTADA.....	i
AUTORIZACIÓN PARA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL	ii
APROBACIÓN DEL TUTOR	iii
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD.....	iv
APROBACIÓN TRIBUNAL	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE IMAGENES	xi
RESUMEN EJECUTIVO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	9
CAPÍTULO II	9
METODOLOGÍA	9
ÁREA DE ESTUDIO.....	9
DISEÑO DE MUESTREO	9
LEVANTAMIENTO DE IMÁGENES ESPECTRALES	11
PROCESAMIENTO DE IMÁGENES ESPECTRALES	13
ÍNDICES DE VEGETACIÓN	14
CAPÍTULOS VARIOS.....	15
RESULTADOS PRELIMINARES	15

DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL.....	17
PLAN DE PROPUESTAS.....	18
RESULTADOS ESPERADOS.....	19
CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES Y PRESUPUESTO PRELIMINAR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	27
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	28
REFERENCIAS.....	31

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Información de bandas multiespectrales	13
Tabla 2. Especies de plantas más representativas de Quito	19
Tabla 3. Especies forestales esperadas en el presente estudio.	20
Tabla 4. Resultados esperados de los índices de vegetación	22
Tabla 5. Cronograma de actividades.....	27
Tabla 6. Presupuesto preliminar.....	28

ÍNDICE DE IMAGENES

Imagen 1.	11
Imagen 2.	15
Imagen 3.	15
Imagen 4.	16
Imagen 5.	16
Imagen 6.	17

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA

FACULTAD DE CIENCIAS DEL MEDIO AMBIENTE

CARRERA DE INGENIERÍA BIODIVERSIDAD Y RECURSOS GENÉTICOS

TEMA: MANEJO DE FIRMAS MULTIESPECTRALES CAPTADAS CON RPAS (SISTEMAS AÉREOS PILOTADOS DE FORMA REMOTA) PARA LA DIFERENCIACIÓN DE VEGETACIÓN URBANA EN UN VALLE INTERANDINO.

AUTOR: Zaskya Nataly Villacís Ñacato

TUTOR: Ph. D., Santiago Patricio Bonilla Bedoya

RESUMEN EJECUTIVO

El arbolado urbano brinda servicios ecosistémicos al ambiente y al ser humano; en este sentido, la teledetección permite identificar y solucionar problemas referentes a la silvicultura urbana, mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados denominadas plataformas junto con distintos tipos de sensores, por ejemplo, los multiespectrales. Con estas técnicas y estos instrumentos se puede desarrollar un monitoreo forestal urbano eficiente para los procesos de planificación. El objetivo principal de este estudio se enfoca en el análisis de firmas multiespectrales captadas con Sistemas Aéreos Pilotados de Forma Remota (RPAS) para la diferenciación de vegetación en los gradientes urbanos de la ciudad de Quito, generando información provechosa para conocer la composición del arbolado urbano e incluir políticas dirigidas a alcanzar una sostenibilidad urbana a través del manejo de esta vegetación. Para esto presentamos un protocolo que considerará un diseño de muestreo, la colección de imágenes, la elaboración de ortofotomosaicos y finalmente su clasificación para determinar las especies de flora de la ciudad. Esta información será útil para los desafíos del manejo forestal urbano en la ciudad de Quito.

DESCRIPTORES: Arbolado urbano, desarrollo sostenible, imágenes multiespectrales, teledetección.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA

FACULTAD DE CIENCIAS DEL MEDIO AMBIENTE

CARRERA DE INGENIERÍA BIODIVERSIDAD Y RECURSOS GENÉTICOS

THEME: MANAGEMENT OF MULTISPECTRAL SIGNATURES CAPTURED WITH RPAS (REMOTELY PILOTED AERIAL SYSTEMS) FOR URBAN VEGETATION DIFFERENTIATION IN AN INTER-ANDEAN VALLEY

AUTHOR: Zaskya Nataly Villacís Ñacato

TUTOR: Ph. D., Santiago Patricio Bonilla Bedoya

ABSTRACT

Urban trees provide ecosystem services to the environment and to human beings; in this sense, remote sensing allows identifying and solving problems related to urban forestry, through the use of unmanned aerial vehicles called platforms together with different types of sensors, for example, multispectral sensors. With these techniques and tools, efficient urban forest monitoring can be developed for planning processes. The main objective of this study focuses on the analysis of multispectral signatures captured with Remotely Piloted Aerial Systems (RPAS) for the differentiation of vegetation in the urban gradients of the city of Quito, generating useful information to know the composition of urban trees and include policies aimed at achieving urban sustainability through the management of this vegetation. For this, we present a protocol that will consider a sampling design, the collection of images, the elaboration of orthophotosmosaics and finally their classification to determine the species of flora of the city. This information will be useful for the challenges of urban forest management in the city of Quito.

KEYWORDS: Multispectral signatures, remote sensing, urban forest, urban sustainability

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial las ciudades representan el tres por ciento de la superficie terrestre, son responsables del 75% de las emisiones de gases de efecto invernadero y son la causa de más del 60% del consumo de energía del planeta (FAO, 2019). La expansión urbana provoca que los ecosistemas naturales se agoten y degraden mermando sus beneficios ecológicos (Bonilla-Bedoya *et al.*, 2020), es así como el desarrollo sostenible en ciudades y comunidades considerado entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible para el 2030 (Moran, 2021) con ayuda de la naturaleza, se enfoca en mejorar y aumentar la resiliencia la planificación territorial de las ciudades enfocándose en crear urbes más limpias, seguras y habitables (FAO, 2019).

La vegetación urbana y áreas verdes urbanas o infraestructura verde brindan ventajas a los sistemas socioecológicos: servicios de aprovisionamiento, regulación y culturales; teniendo en cuenta que la calidad de vida humana en el medio urbano depende de la relación entre los residentes y el medio ambiente (Bonilla-Bedoya *et al.*, 2020). El arbolado urbano se compone de cualquier tipo de vegetación ubicada en un área metropolitana: bosques, árboles, arbustos y plantas leñosas en parques, aceras y rincones abandonados (Shojanoori & Shafri, 2016; Bonilla-Bedoya *et al.*, 2020).

Una de las herramientas clave para conocer la extensión, salud y estado de los bosques es el monitoreo forestal. Históricamente, el método clásico para el levantamiento de datos y la recopilación de información de ecosistemas forestales fue la observación directa en campo. Sin embargo, los avances tecnológicos y el desarrollo de satélites artificiales en la década de los 50 les facilitó a los silvicultores obtener información más rápida y específica de territorios

inaccesibles e incluso remotos, utilizando técnicas y tecnológicas de teledetección (MicaSense, 2020).

La teledetección es una técnica o procedimiento que permite adquirir información de objetos a distancia, es decir, no existe contacto directo o material con el sistema observado. El resultado de esta práctica se presenta en formato de imagen que posteriormente son sometidas a tratamiento y análisis (Chuvieco, 1996; Castaño *et al.*, 1996). La teledetección es posible por el uso de sensores, cámaras, escáneres, láseres, entre otros instrumentos (MicaSense, 2020), estos logran capturar la respuesta espectral propia de los elementos de la superficie terrestre para conocer que fenómenos se producen sobre ellos, aplicando principios básicos de la física: la radiación electromagnética como fuente de energía, la interacción de la energía electromagnética con la atmosfera y la interacción de la energía electromagnética con los objetos de la superficie terrestre. Al mismo tiempo, los componentes fundamentales de todo sistema de teledetección son: una plataforma, fuente energética, un sensor y un objeto para observación (Castaño *et al.*, 1996).

Una plataforma es un vehículo aéreo, un satélite o un avión que transporta los dispositivos necesarios para captar, almacenar, y transmitir imágenes a distancia. Dependiendo del propósito del satélite, estos pueden orbitar la tierra en diferentes trayectorias y altitudes clasificándose en órbita heliosíncrona y órbita geoestacionaria. Un sensor es el instrumento presente en la plataforma que cuenta con la tecnología necesaria para percibir dichas imágenes a distancia, capturan información en diferentes regiones del espectro y cada región se denominada canal o banda. Los sensores pueden clasificarse en pasivos y activos, el primero recibe la radiación reflejada por la Tierra, es decir, la emitida por el sol, el segundo emite su propia radiación y reciben su reflejo. Otra clasificación de los sensores es por el tipo de procedimiento

para grabar la energía aceptada: sistemas fotográficos (cámaras), sistemas de barrido (óptico-mecánicos y óptico-electrónicos) y los sistemas de microondas (radares) (Álvarez & Morales, 2020).

La información obtenida por métodos de teledetección depende de cuatro resoluciones. La resolución espacial es la cantidad de píxeles presentes en una imagen y el nivel de detalle que brindan los datos. La radiación espectral identifica en cuantas regiones espectrales distintas puede medir el sensor la energía reflejada. La resolución temporal se refiere a la frecuencia con la que la plataforma puede recopilar la información de un mismo sitio. Y, por último, la resolución radiométrica es la capacidad del sensor para distinguir diferencias en la energía reflejada (Koch, 2013; Lara & Chamorro, 2018; MicaSense, 2020).

Si bien la puesta en marcha de la teledetección se remonta a las plataformas de observación aérea, como el globo aerostático, junto con los primeros procedimientos fotográficos en 1859 (NASA, s.f.), no sería hasta el lanzamiento del primer satélite artificial Sputnik en 1957 por la Unión Soviética para la observación de la Tierra, que se daría el inicio formal de la teledetección moderna (Martínez Vega *et al.*, 2010). En 1960 con el fin de obtener una información más organizada de la observación de la Tierra, se envía al espacio TIROS-I, primer satélite artificial que proporcionaría datos meteorológicos. Este instrumento poseía una cámara de televisión de baja resolución, a pesar de esto el satélite enviaba a tierra imágenes cada 6 horas y permitía a los expertos del clima diferenciar entre nubes, agua, hielo y nieve, 10 años más tarde TIROS se convertiría en NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). En 1969 inician las misiones de Apollo-9 para estudios de recursos terrestres, este vuelo brindaría las primeras observaciones de fotografía orbital multispectral ya que se colocaron cuatro cámaras

Hasselblad con filtros multiespectrales y películas en blanco y negro sensibles a distintas longitudes de onda (Martínez Vega *et al.*, 2010; NASA, s.f.).

En 1972 la NASA desarrolla el proyecto ERTS (Earth Resources Technological Satellite) más conocido como LANDSAT, primer satélite enfocado en la evaluación de recursos naturales, posteriormente fueron puestos en órbita una serie de satélites hasta el último en 2021 LANDSAT 9. Estos satélites barren la superficie terrestre cada 16 días, contienen dos sensores OLI (Operational Land Imager) que opera con nueve longitudes de onda proporcionando imágenes de resolución máxima de hasta 15m y TIRS (Thermal Infrared Sensor) que opera con ocho bandas de longitud de onda infrarroja y una resolución espacial de 100m, este analiza la temperatura de la superficie, la transferencia de calor y humedad, gestión del agua, entre otros (Martínez Vega *et al.*, 2010; Sacristán, 2016; Servicio Geológico de los Estados Unidos, 2021).

En 1986 los países Francia, Bélgica y Suecia lanzan el satélite SPOT proveyendo imágenes estereoscópicas. En 1991 la Agencia Espacial Europea lanza el satélite ERS-1 en 1995 el ERS-2 con el objetivo de complementar los sensores ópticos de LANDSAT y SPOT para el estudio de océanos y criosfera. Entre 1999 y 2001 lanzan los satélites de alta resolución, IKONOS-2 con 1m de resolución espacial y QuickBird con dos cámaras de alta resolución, 61cm en modo pancromático y de 2,5m en modo multiespectral. Por otro parte, entre 1999 y 2002 la NASA desarrolla el proyecto EOS y envía más satélites al espacio, TERRA y AQUA. Los sensores utilizados en este proyecto son: ASTER, MODIS, CERES, MISR, MOPITT que servirían para recolectar imágenes para fines ambientales y estudios de procesos globales (Martínez Vega *et al.*, 2010).

Para el año 2007 Canadá lanzaría el satélite Radarsat-2, sistema SAR con resolución de hasta 3m y polarizaciones. A partir del 2014 Canadá junto con la Agencia Espacial Europea

desarrollan el proyecto Copérnico dando inicio al lanzamiento de una serie de satélites SENTINEL. En total este proyecto tuvo tres lanzamientos, el primer satélite contaba con radar de apertura sintética (SAR) y se usó para servicios terrestres y oceánicos. SENTINEL-2 estaría destinado para trabajos de cambios en la corteza terrestre, vegetación y gestión de desastres naturales. Mientras que SENTINEL-3 proporcionaría información para predicciones climáticas y oceánicas, ambos satélites capturaban imágenes multiespectrales (Instituto Geográfico Nacional, 2022).

El inicio de la teledetección se centró en fines civiles, militares y cartográficos, no obstante, transcurriría poco tiempo para abordar nuevos objetivos científicos en diferentes campos (Pérez & Muñoz, 2006). Todas las ciencias han logrado beneficiarse del análisis de imágenes captadas por satélites artificiales, especialmente las ciencias de la tierra y las ciencias de la vida. Es así como aparece la teledetección ambiental o de recursos naturales, que se enfoca en la obtención de información a distancia, pero esta vez acerca de la biosfera (Sacristán, 2016). El empleo de estos modernos procedimientos permite identificar alteraciones en la biodiversidad, determinar características biofísicas del hábitat de especies (Tserej, s.f.). Aparte, se pueden registrar distintos tipos de datos, como: meteorológicos, de calidad del aire, hidrológicos, calidad del agua, prevención de incendios, actividad sísmica, expansión urbana, desastres naturales, y demás.

Con el paso del tiempo y los avances tecnológicos, la captura de imágenes multiespectrales se basó en la elección de nuevas plataformas como por ejemplo los drones, también conocidos por aeronaves no tripuladas (UA), vehículos aéreos no tripulados (UAV), aeronave piloteada por control remoto o sistemas de aeronaves pilotadas por control remoto (RPAS). Estos instrumentos lograron ser cotizados en términos de resolución espacial pues son

mejores que las imágenes satelitales. Presentan datos más precisos ya que llegan a lugares de difícil acceso y la imagen se puede capturar las veces que sean necesarias debido al aumento de la frecuencia de monitoreo (Andújar, 2017).

El uso de estos vehículos se centró en los recursos naturales específicamente en monitoreos forestales, con la calidad de las cámaras multispectrales se lograron realizar proyectos con mayor exactitud, mayor cobertura y eficiencia. Una de las ventajas de los drones en silvicultura es que su resolución permite analizar los árboles de manera individual. Algunos de los proyectos que se realizan con drones son: mapeo de densidad arbórea, conteo de rodales, verificar la salud de los árboles mediante clorofila y biomasa, identificación y monitoreo de plagas o enfermedades, monitoreo de especies invasivas, clasificación de especies, monitoreo de incendios forestales, entre otros (MicaSense, 2020). Otro ejemplo es la agricultura de precisión, la cual trata de mejorar el manejo de suelos y cultivos a través del uso adecuado de insumos, con el fin de abaratar costos en este sector y promover una agricultura sostenible (García & Flego, 2008; Kharuf-Gutierrez *et al.*, 2018).

Los drones también pueden hacer frente a problemas sociales y ambientales relacionados con la sobrepoblación y el cambio de uso de suelo de las zonas rurales a zonas urbanas. El rápido crecimiento demográfico ha llevado a los responsables municipales (Murray, 1996) a suplir la necesidad de construir nuevos caminos (Luna *et al.*, 2018) y más viviendas para la población, lo que genera cambios en el uso del suelo, debilitando la cobertura vegetal de las zonas urbanas y periféricas de las urbes (Hernández *et al.*, 2016). Los ecosistemas forestales urbanos del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) no han sido la excepción, ya que el área urbana de esta ciudad creció un 500% en tan solo 18 años (Salazar *et al.*, 2021).

Por otra parte, el bosque nativo de Quito de las zonas periurbanas y rurales se ha visto afectado por el cambio de uso de suelo junto con las actividades antrópicas (Durán *et al.*, 2016) que conlleva este, dejando así a los remanentes de bosque de importancia y valor ecológico en las estribaciones occidentales del Volcán Pichincha (MECN, 2009). Tanto los territorios surorientales como nororientales del DMQ son un reflejo del estilo de vida urbano en la descentralización del núcleo urbano, es así como el sector inmobiliario e industrial han producido modificaciones socioespaciales en el paisaje natural estas zonas (Durán *et al.*, 2016; Salazar & Paliz, 2018).

Los estudios locales respecto al análisis espacial son escasos pero variados. Identificación de zonas de recurrencia de incendios forestales, verificación del crecimiento urbanístico, estimación de material particulado, afectaciones por minería en zonas hídricas, son algunos de los trabajos realizados en el DMQ que han hecho uso de las imágenes espectrales. También, existe un estudio que utiliza índices vegetales para conocer el estado de cultivos frutales (Guerrón, 2020), sin embargo, no se toma en cuenta los efectos que puede suscitar el cambio climático en estas zonas. Por otro lado, hay un análisis de los efectos que causan las islas de calor urbano en la ciudad (Lozada, 2020), pero no se contempla los efectos que causan estas en la vegetación urbana.

Por último, el estudio de (Bedoya-Bonilla *et al.*, 2020), se presenta un catálogo de la vegetación urbana de Quito y se hace uso de imágenes satelitales de cobertura de suelo, aunque sin analizar los efectos del cambio climático en el arbolado quiteño. En el DMQ no existen estudios en los que se hayan ocupado imágenes espectrales para identificar vegetación y además que se haya realizado un análisis de los efectos del cambio climático en la cobertura vegetal urbana. Un índice de vegetación se define como "un parámetro calculado a partir de los valores

de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y que es particularmente sensible a la cubierta vegetal” (Muños Aguayo, 2013, p. 2). Mediante este índice se realiza la cobertura vegetal y se puede conocer el estado de salud de este, adicional con estos mismos resultados se puede verificar si este estado de salud está o no relacionado con los efectos del cambio climático.

El arbolado urbano presenta varios beneficios que pueden aumentar el bienestar humano y la calidad ambiental de las zonas urbanas y periurbanas, son un componente clave en la infraestructura de las ciudades y son considerados una tecnología viva por las siguientes razones: mejoran la calidad del aire, pues logran absorber los gases que contaminan el aire, producidos por actividades antropogénicas; mejoran la calidad del agua en la urbe y previenen desastres naturales ligados a derrumbes y desbordamientos de ríos, estas dos acciones van de la mano ya que el tener arboles se reduce el riesgo de desbordamiento de aguas pluviales e inundaciones, las raíces de los árboles absorben el agua y evitan la erosión del suelo; evitan la formación de microclimas por las islas de calor ya que brindan sombra reduciendo la temperatura en el centro de las ciudades, a su vez minimizan el consumo de energía de calefacción y refrigeración; mitigan el cambio climático; reducen la contaminación acústica disipando el ruido; previenen varias enfermedades respiratorias; protegen y conservan biodiversidad urbana importante; reducen el estrés en las personas ya que son fuente de recreación e inspiración estética (Dwyer *et al.*, 1992; Nowak, 2008; Shojanoori & Shafri, 2016)

Es por esta razón que el objetivo de este estudio se enfoca en el análisis de firmas multispectrales captadas con Sistemas Aéreos Pilotados de Forma Remota (RPAS) para la diferenciación de vegetación en los gradientes urbanos de la ciudad de Quito, generando información provechosa para conocer la composición del arbolado urbano e incluir políticas dirigidas a alcanzar una sostenibilidad urbana a través del manejo de esta vegetación.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Levantar imágenes espectrales de Sistemas Aéreos Pilotados de Forma Remota considerando distintas especies de vegetación urbana en los gradientes urbanos de la ciudad de Quito.
- Diferenciar a través de firmas espectrales la vegetación urbana capturada en la imagen.
- Determinar la composición de vegetación quiteña para generar políticas destinadas a la protección del arbolado urbano que mejoren la calidad de vida urbana.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

ÁREA DE ESTUDIO

Este estudio se relaciona con el levantamiento fotográfico multiespectral del bosque urbano en el norte del Distrito Metropolitano de Quito. Ciudad localizada en la Cordillera de los Andes a 2850 m.s.n.m. (Ortiz, 2015) que tiene un extenso rango altitudinal con una serie de unidades geomorfológicas, pisos climáticos y formaciones vegetales, siendo un ecosistema heterogéneo con una abundancia de recursos naturales (MECN, 2009).

DISEÑO DE MUESTREO

El diseño de muestreo considero la clasificación de cobertura de suelo realizada por Bonilla-Bedoya *et al.*, 2020. Se estableció un espacio geográfico de 46 unidades administrativas y 5544 manzanas censales, se establecieron fases de recolección de información y análisis de datos. Dentro de la primera fase se realizó la clasificación de cobertura urbana basada en la clasificación de objetos, aquí establecieron una dimensión forestal a escala espacial utilizando imágenes del satélite Airbus de sensores SPOT 6 Y SPOT7, la resolución espacial de la imagen

pancromática fue de 1,5m y la resolución de la imagen multiespectral para determinar arbolado urbano y áreas verdes fue de 6m (azul: 455–525 μm , verde: 530–590 μm , rojo: 625–695 μm e infrarrojo: 760– 890 μm).

El proceso de clasificación de las imágenes consto en tres fases: la primera efectuó la corrección atmosférica de la imagen con la herramienta ATCOR; la segunda fase generó mosaicos con el software OrthoEngine y la última fase clasificó los objetos con g, herramienta útil ya que segmenta la imagen para proceder con la clasificación y análisis. Se usaron todas las bandas disponibles pancromáticas y multiespectrales para mejorar la clasificación. Se creo una tabla de atributos numéricos con identificaciones únicas a partir de la capa de objeto o polígono. Se procedió a extraer las características estadísticas de cada segmento o polígono, es decir, se extrajo una función de los pixeles de la imagen dentro de un objeto de cada banda; las características geométricas (circular, compacta, alargada y rectangular) fueron calculadas analizando los límites de los polígonos segmentados.

El diseño de muestreo se estableció en formato de cuadrícula sobre la imagen pancromática y se seleccionaron sitios de capacitación para siete clases de uso de tierra: pasto (6056 polígonos), arbustos y hierbas (8402 polígonos), bosques (16545 polígonos), suelo (5490 polígonos), agua (732 polígonos), agricultura (5438 polígonos) e impermeable (22399 polígonos). La precisión fue evaluada a través de una muestra de clases con el 30% de cada clase, generando una matriz de confusión y errores de emisión y comisión por sección para deducir un índice de kappa de validación.

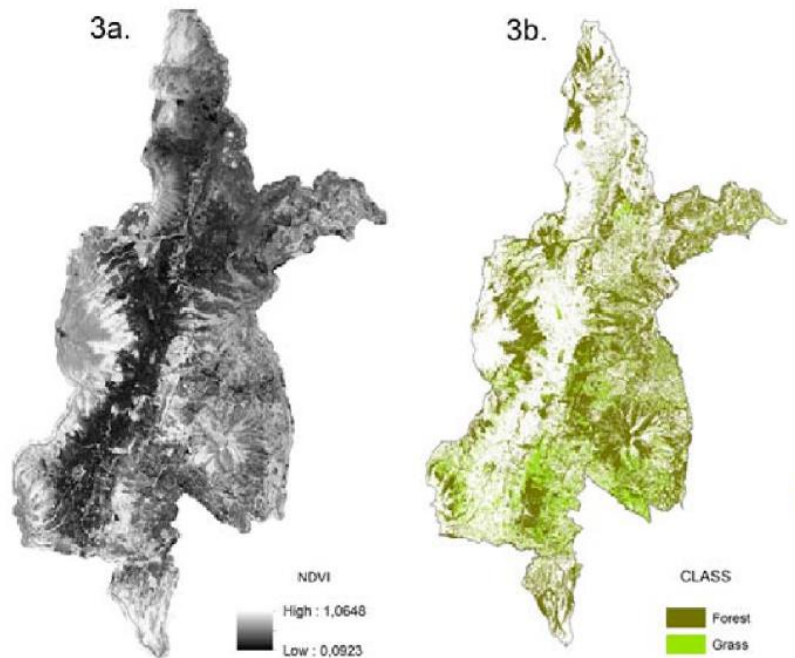


Imagen 1. Tomado de Bonilla-Bedoya et al., 2020 variables medidas para la categoría forestal de alto nivel: a) índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), b) densidad de áreas verdes y bosques urbanos en las manzanas censales.

Considerando la clasificación de cobertura se generará un muestreo aleatorio sobre el componente forestal que incluirá 60 imágenes de cinco bandas. Su procesamiento dará información de la composición vegetal de la ciudad.

LEVANTAMIENTO DE IMÁGENES ESPECTRALES

Para esta actividad se realizaría una fase de campo utilizando un sistema aéreo pilotado de forma remota Inspire 2 de alimentación eléctrica tipo multicolor con una cámara multiespectral de alta resolución con 5 bandas y un GPS integrado. Para realizar los vuelos con RPAS debe considerar lo siguiente: alturas permitidas, obstáculos, vientos, puntos de lanzamiento y aterrizaje (Kharuf-Gutierrez *et al.*, 2018); se debe realizar el ensamblaje del vehículo aéreo, calibrar el control remoto, verificar la conexión de telemetría y calibrar la

brújula, en este caso se utilizaría la aplicación DJI GO 4 que permitirá controlar el vuelo del dron y filmar las capturas desde un teléfono celular.

Una vez insertadas las coordenadas del punto de interés de captura de las imágenes se define el plan y patrón de vuelo en el software Pix4D, aquí se debe seleccionar una misión en 2D ya sea en formato de polígono o cuadrícula. El siguiente paso es personalizar los parámetros de mapeo, en este caso: velocidad – media, ángulo – 90° (vertical), sobreposición – 80%, fase – forward, el tiempo estimado de vuelo debe ser 25 minutos y se debe configurar la distancia de muestreo del suelo (GSD) según las necesidades, este último se refiere a la distancia entre el centro de dos píxeles consecutivos medidos desde el suelo. Un píxel se define como una pequeña parte del objeto de clasificación (Shojanoori & Shafri, 2016) por lo que si se considera un GSD alto la imagen tendrá detalles menos visibles, se puede considerar la siguiente ecuación (Hernández, 2017).

$$\text{Área} = GSD \times GSD [m/pixel^2]$$

De esta manera, los vuelos se ejecutarían de manera automática asistidos por telemetría de acuerdo con el patrón generado.

Las sesiones fotográficas por realizar sobre el punto de interés para adquirir la firma multiespectral georreferenciada (geotag) en 5 bandas espectrales: rojo, verde, azul, red Edge e infrarrojo cercano se realizarían con la cámara Micasense configurada de igual manera en Pix4D, en la tabla 1 se muestra las especificaciones de la longitud de onda y ancho de cada banda. La información de las bandas que se detalla a continuación es distinta debido a que cada espectro de luz muestra datos de estados diferentes de las plantas en el ambiente, esto da como resultado una firma multiespectral que consigna datos cuantitativos específicos sobre el vigor de la vegetación.

Tabla 1. Información de bandas multispectrales

Nº de banda	Nombre de la banda	Centro de longitud de onda (nm)	Ancho de banda (nm)
1	Rojo	668	10
2	Verde	560	20
3	Azul	475	20
4	Red Edge	717	10
5	Infrarrojo cercano	840	40

Fuente: (Bonnaire *et al.*, 2021)

PROCESAMIENTO DE IMÁGENES ESPECTRALES

La segunda fase consta en realizar un control de calidad de las imágenes capturadas, ya que la capacidad de carga útil de los vehículos aéreos no tripulados es baja a menudo se utilizan cámaras digitales sencillas con pequeñas adaptaciones, por lo que las fotos captadas con este tipo de cámaras sufren distorsiones a diferencia de las cámaras utilizadas para el mapeo tradicional. Se debe realizar una preevaluación de imágenes, una calibración y un control inicial previo a la constitución del ortomosaico. Tomando en cuenta la altura del vuelo y los datos de la posición de cada imagen, se generará un proceso inicial y cálculo de resolución óptima, con el fin de obtener una resolución promedio de 10cm/píxel, considerando que la resolución de una cámara multispectral no es igual a una cámara RGB tradicional. Posterior a la calibración de imágenes se realizará el proceso de ortorectificación de estas, el cual consta de la eliminación de imperfecciones de las imágenes provocadas por el sensor, variaciones topográficas y curvaturas de la tierra. Finalmente, la imagen capturada en el punto de interés tendría un total de 5 imágenes correspondiente a cada banda.

ÍNDICES DE VEGETACIÓN

Un índice de vegetación se define como un parámetro calculado a partir de la combinación de los valores de la reflectividad a distintas longitudes de onda que sirven para realzar la vegetación en función de una respuesta espectral y atenuar los detalles de otros elementos como el suelo, la iluminación, el agua, entre otros. A través de esto se puede verificar el estado de salud de la vegetación influenciado por el cambio climático utilizando el índice de vegetación de diferencia normalizada, este sirve como indicador básico de biomasa fotosintéticamente activa, diferenciar la vegetación de la cubierta terrestre artificial, así como procesos de crecimiento inusuales. La fórmula de este índice es la siguiente: $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$, donde NIR es la luz del infrarrojo cercano y Rojo es la luz roja visible, funciona contrarrestando matemáticamente la cantidad de luz roja visible absorbida y la luz infrarroja cercana reflejada. Los resultados de este índice van de -1 a 1, donde los valores negativos representan una vegetación muerta o poco saludable y los valores positivos reflejan una vegetación densa y sana (Díaz, 2015; Gilabert *et al.*, 1997).

Otro de los índices a aplicar en este estudio para complementar el (NDVI) es el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) que sirve para monitorear el estado de vegetación, es decir medir los niveles de ausencia de vegetación menores o igual a cero y presencia de vegetación con valores mayores a uno, la fórmula es la siguiente $EVI = G \times (NIR - RED) / (NIR + C1 \times RED - C2 \times BLUE + L)$ aquí se adiciona la banda azul y $G=2.5$, $C1=6$, $C2=7.5$ y $L=1$, es similar al NDVI pero tienen menor sensibilidad al ruido de fondo (SNIA, 2022). Estas imágenes son procesadas con las calculadoras de software de sistemas de información geográfica libres o de paga como: ArcGIS, QGIS, SAGA GIS, gvSIG, GRASS GIS, PCI entre otros.

CAPÍTULOS VARIOS

RESULTADOS PRELIMINARES

A continuación, se presenta un ejemplo de 5 firmas multispectrales correspondientes a cada banda, capturada con un vehículo aéreo pilotado de forma remota.

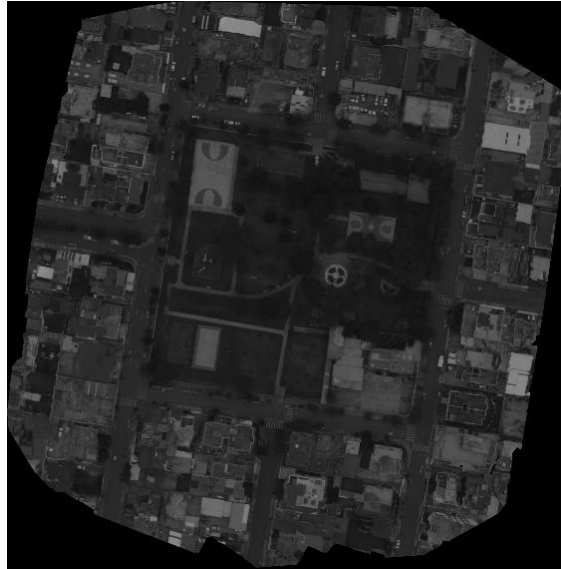


Imagen 2. Banda azul

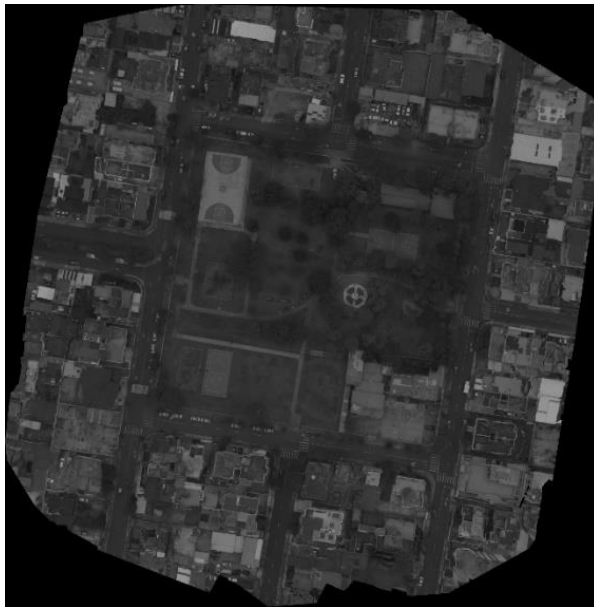


Imagen 3. Banda verde

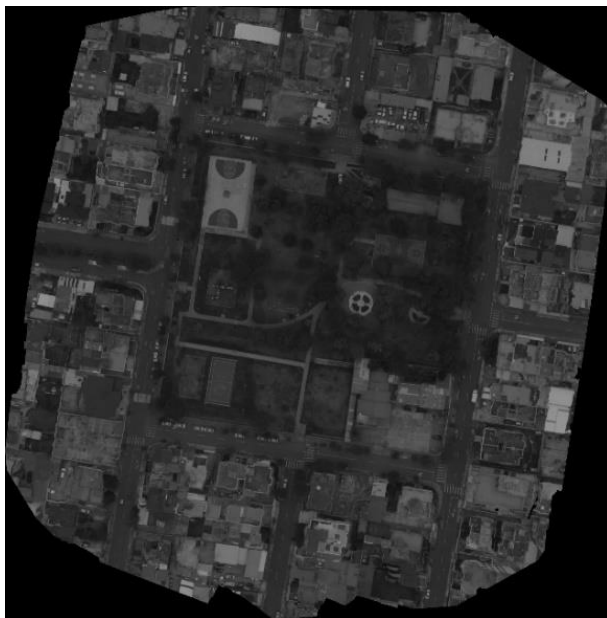


Imagen 4. Banda roja

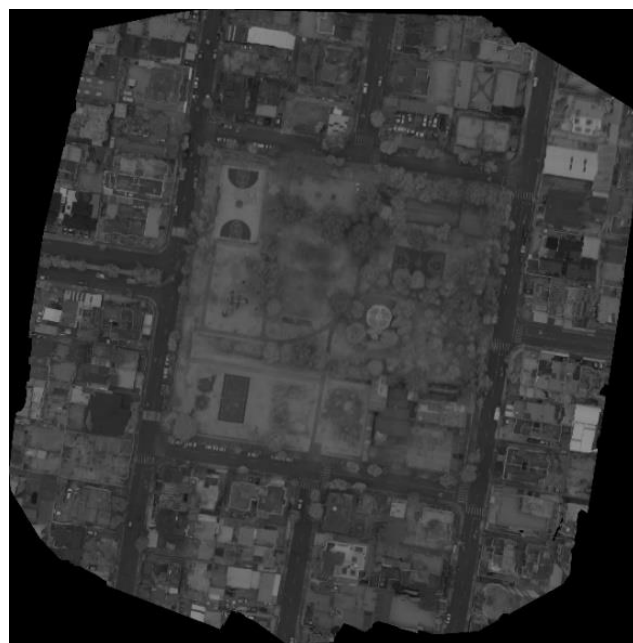


Imagen 5. Red Edge

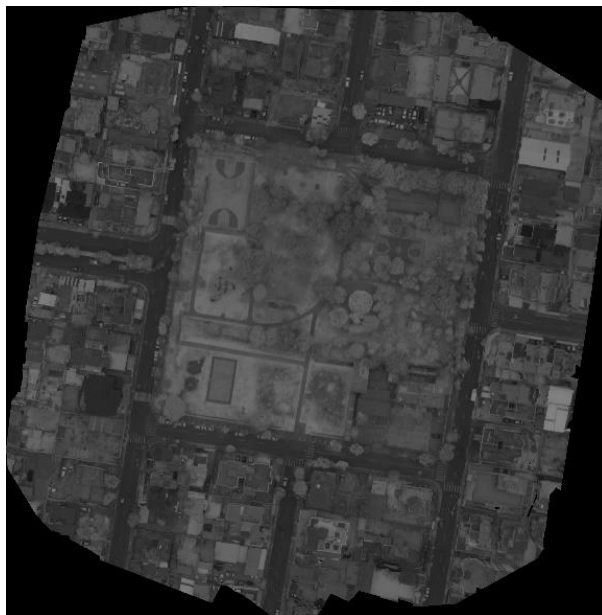


Imagen 6. Infrarrojo cercano

Estas imágenes serían sometidas a un análisis para obtener información de clasificación de especies y el estado de salud de la vegetación, se explicará en el siguiente apartado.

DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

El índice verde urbano de Quito está conformado por áreas como parques, quebradas, cementerios, jardines, estadios, redondeles, lotes baldíos (Gómez, 2020), y a pesar de que Quito es considerada una de las ciudades con más vegetación urbana del país y una de las 59 ciudades más arboladas del mundo, la cobertura vegetal existente no ha sido suficiente para suplir la escasez del 34% de áreas verdes de la capital del Ecuador (Guerrero, 2020). Al norte de Quito lo que prima y cohabita con los ciudadanos son los parques y la red de arbolado urbano que está presente en aceras y parterres, por lo que el enfoque de conservación de especies vegetales urbanas debería concentrarse a estas zonas. El uso de RPAS es una forma económica y eficaz de llegar a cualquier punto remoto donde exista vegetación, por lo que implementar un monitoreo forestal en el DMQ utilizando firmas multispectrales sería vital para conocer y conservar las especies de árboles urbanos que disponemos junto con sus servicios ecosistémicos.

PLAN DE PROPUESTAS

Para solventar la falta de estudios de monitoreo de vegetación urbana se pretende realizar lo siguiente:

En primer punto la recolección de firmas multiespectrales, esta actividad se dividiría en fases, la primera una salida de campo o exploratoria en la que un dron cumpla con su trabajo de captura de fotografías del punto de interés, en este caso en el parque Julio Matovelle ubicado en el sector de la Kennedy. La siguiente fase corresponde a un análisis de laboratorio para procesar las imágenes e identificar la vegetación presente en la zona de estudio, esta etapa es muy importante ya que se lograría identificar especies vegetales evitando un contacto directo con estas para identificarlas taxonómicamente lo que en términos de recursos humanos y tiempo es mucho más óptimo y rápido en relación con una identificación tradicional de campo. Se trabajaría en el programa PCI (Geomática para procesamiento digital) para ortorrectificación de las imágenes y se realizaría una clasificación supervisada de las imágenes para aplicar una clasificación por máxima verosimilitud, de esta manera se podrá realizar una clasificación de píxeles con el fin de conocer a que objeto corresponde cada píxel.

La tercera fase de la propuesta corresponde a la aplicación de índices de vegetación para conocer qué tan sana es la vegetación presente en la zona de estudio y como puede aportar ecológicamente tanto al ambiente como a la sociedad. En este punto y con los índices NDVI y EVI también se puede conocer si el cambio climático o los efectos de este están provocando daños en la vegetación urbana o si en su defecto están mermando los efectos de este fenómeno. De igual manera, el aporte de esta sección es importante puesto que se podrían presentar medidas tempranas para frenar los efectos del cambio climático que pueden afectar a la salud humana como al componente biótico de la ciudad.

En la última fase de la propuesta se plantearán políticas de protección que ayuden al cuidado del arbolado urbano quiteño diseñadas a impulsar el desarrollo sostenible dentro de la urbe utilizando las ventajas de la composición de vegetación que presenta la ciudad.

RESULTADOS ESPERADOS

Con respecto a la captura de fotografías con vehículos aéreos es fundamental seleccionar el horario de toma de imágenes debido a que no debe presentar sombras, nubosidad, no se debe realizar en días lluviosos y de preferencia entre la mañana. Por lo tanto, la planificación de vuelo debe estar muy bien organizada para no presentar ninguno de estos fenómenos en la imagen. En caso de no contar con las condiciones climáticas adecuadas, se tendrá que proceder a una fase de gabinete para limpiar las imágenes y preservar los elementos que se desean para el análisis.

Quita cuenta con una amplia variedad de especies forestales, estudios como: Aragundi *et al.*, 2020 y Bonilla-Bedoya *et al.*, 2020 indican que existen alrededor de 84 y 118 especies forestales, respectivamente. Son 10 las especies dominantes presentes en el DMQ según el primer estudio y se presentan en la tabla 2, mientras que en el sector de la Kennedy que corresponde al punto de interés de captura de imágenes, el estudio identificó 39 especies vegetales entre las más dominantes comúnmente conocido como Fresno europeo y Molle ambas especies introducidas.

Tabla 2. Especies de plantas más representativas de Quito

Nombre científico	Nombre común
<i>Callistemon salignus</i>	Calistemo blanco
<i>Acacia melanoxylon</i>	Acacia negra
<i>Fraxinus excelsior</i>	Fresno europeo

<i>Chionanthus pubescens</i>	Arupo rosado
<i>Eriobotrya japonica</i>	Níspero
<i>Acacia baileyana</i>	Acacia purpúrea
<i>Populus alba</i>	Álamo plateado
<i>Sambucus peruviana</i>	Tilo
<i>Ficus benjamina</i>	Ficus benjamina
<i>Salix humboldtiana</i>	Sauce criollo

Fuente: (Aragundi *et al.*, 2020 y Bonilla-Bedoya *et al.*, 2020)

Ahora bien, con estos antecedentes forestales, en la clasificación de píxeles se espera encontrar agrupaciones de las siguientes especies forestales, como se presenta en la tabla 3.

Tabla 3. Especies forestales esperadas en el presente estudio.

Nombre científico	Nombre común
<i>Alnus acuminata</i>	Aliso
<i>Fraxinus excelsior</i>	Fresno europeo
<i>Schinus molle</i>	Molle
<i>Ficus benjamina</i>	Ficus benjamina
<i>Cupressus sempervirens</i>	Ciprés común
<i>Salix humboldtiana</i>	Sauce criollo
<i>Callistemon salignus</i>	Calistemo blanco
<i>Hibiscus rosa-sinensis</i>	Cucarda

<i>Inga insignis</i>	Guaba
<i>Populus nigra</i>	Álamo negro
<i>Populus alba</i>	Álamo plateado
<i>Senna multiglandulosa</i>	Chinchin
<i>Prunus serotina</i>	Capulí
<i>Callistemon viminalis</i>	Cepillo llorón
<i>Aloe arborescens</i>	Aloe candelabro
<i>Tecoma stans</i>	Cholán
<i>Abutilon striatum</i>	Farol chino
<i>Brugmansia suaveolens</i>	Guanto rosado
<i>Senna didymobotrya</i>	Acacia
<i>Eriobotrya japonica</i>	Níspero
<i>Delostoma integrifolium</i>	Yalomán
<i>Nerium oleander</i>	Laurel de cera
<i>Brugmansia suaveolens</i>	Guanto rosado
<i>Acacia melanoxylon</i>	Acacia negra

Fuente: (Aragundi *et al.*, 2020; Bonilla-Bedoya *et al.*, 2020)

Por lo tanto, se espera encontrar más menos 24 especies vegetales, aparte de esta agrupación se espera que los pixeles sean clasificados en cemento, césped, construcciones y suelo desnudo, cabe aclarar que se espera que existan pixeles predeterminados y aislados que no corresponderían a ninguna clasificación. El estudio más cercano a esta propuesta es el de (Aragundi *et al.*, 2020), pero este se enfoca en determinar la diversidad de especies del arbolado urbano y su funcionalidad únicamente en la vegetación de las aceras y parterres de 13 zonas del

Distrito Metropolitano de Quito. Por el contrario, este estudio consideraría todas las áreas verdes del punto de interés.

En cuanto a los índices de vegetación, aplicando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) se aspira obtener los resultados presentados en la tabla 4., teniendo en cuenta que el EVI es un índice complementario para evaluar la precisión de NDVI por lo que los resultados deben ser similares

Tabla 4. Resultados esperados de los índices de vegetación

Valores NDVI	Interpretación de resultados	Valores EVI	Interpretación de resultados
0 – 0.33	Vegetación enferma o en mal estado, correspondiente al césped muy podado o suelo desnudo.	0 – 0.27	Presencia de poca vegetación correspondiente al césped.
0.33 – 0.66	Plantas o vegetación medianamente saludable, correspondiente a vegetación próxima a procesos de senescencia natural.	0.27 – 0.69	Presencia de vegetación no muy densa correspondiente a suelos con árboles de hoja caduca.

0.66 – 1	Vegetación completamente sana, correspondiente a la densa cobertura forestal.	0.69 – 1	Presencia de vegetación densa siempreverde o de hoja perenne.
----------	---	----------	---

En ninguno de los dos índices no se esperan valores negativos es decir vegetación muerta o inexistente. A nivel mundial existen pocos estudios referentes al análisis espacial de cobertura vegetal y cambio climático, uno de ellos es el de Pervaiz (2019), una investigación llevada a cabo en dos cementerios de Lahore, ciudad de Pakistán congestionada tanto de personas como de vehículos que en la actualidad se enfrenta a la pérdida de áreas verdes urbanas. Aquí, mediante el uso de imágenes satelitales y el cálculo de tres índices de vegetación, los expertos determinaron que la ausencia de cobertura vegetal urbana sana de estos camposantos estaría afectando la calidad de aire de esta ciudad debido a que no hay suficientes árboles que absorban la contaminación, por lo tanto, se estaría perdiendo una fuente de purificación de aire urbano.

Otro estudio realizado en China (Li D *et al.*, 2020), los investigadores utilizan un índice de vegetación y variables climáticas para determinar la influencia del cambio climático y la urbanización en el estado de salud de la cobertura vegetal de zonas urbanas desarrolladas y zonas urbanas marginales. Se encontró que la degradación de la vegetación urbana está determinada en su gran mayoría por las variables climáticas y en menor influencia por la urbanización y el cambio climático, pero esto dependería de la zona de estudio ya que a pesar de que los sitios urbanos desarrollados presentan más cobertura vegetal que las zonas marginales, no quiere decir que esta vegetación este saludable debido a la gran contaminación que experimenta esta área.

Con estos resultados se puede partir a la identificación de influencia del cambio climático en el arbolado urbano, teniendo índices de vegetación altos se presume que el arbolado urbano sano está cumpliendo con sus roles ecológicos en la urbe quiteña de la siguiente manera:

- Mejorando la calidad del aire, absorbiendo las partículas contaminantes, según la secretaria del ambiente de Quito los niveles de un IQCA son de 0 a 50 y de 51 a 100 un IQCA aceptable. Si estos valores variasen estaría reflejando una absorción baja de partículas en el aire y por ende una vegetación poca saludable (Secretaría del Ambiente, 2022).
- Absorbiendo carbono, cabe recalcar que los árboles urbanos secuestran menor cantidad de carbono en relación con los bosques naturales (Muñoz Tello & Vásquez Córdova, 2020).
- Proveyendo de sombra a los ciudadanos gracias a su altura (Secretaría del Ambiente, 2022).
- Disminuyendo el efecto de isla de calor, mermando la creación de microclimas y el uso de calefacción y aires acondicionados (Secretaría del Ambiente, 2022).
- Atenuando las corrientes de viento (Secretaría del Ambiente, 2022).
- Minimizando la contaminación sonora, tomando en cuenta de los decibelios máximos de contaminación son 53 según la OMS (El Comercio, 2019).
- Reduciendo la erosión del suelo (Secretaría del Ambiente, 2022).
- Teniendo una buena función en evapotranspiración (Aragundi *et al.*, 2020).

Por el contrario, si los resultados de los índices de vegetación son negativos, los árboles no estarían desempeñando en su totalidad las funciones antes mencionadas debido al tipo de vegetación urbana, esto se refiere a que algunos árboles no presentarían una madera densa y dura

para captura el carbono, también depende de la edad y de la densidad del dosel. Por otro lado, depende de las funciones ecológicas que cada árbol pueda brindar, por ejemplo, de hospedar a otras plantas e incluso fauna urbana (Chamorro & Falconi, 2019). Algunas medidas correctivas y preventivas para solucionar estos problemas frente al cambio climático son:

- Considerar la plantación de árboles en áreas verdes ya existentes, para esto se puede contemplar sembrar arboles nativos debido a su mayor capacidad de adaptación al ambiente, requieren un menor mantenimiento en cuanto a riego y reproducción (Chamorro & Falconi, 2019), son menos susceptible a plagas, algunas especies son: Arrayán, Aliso andino, Coco cumbi, Pusupato, Yalomán, Cholán y Cedro andino (Árboles patrimoniales de Quito, 2018).
- Algunos árboles son de crecimiento lento, susceptible a plagas y toleran en ciertos grados la contaminación urbana, por lo que podrían servir como indicadores, por ejemplo: Cedro, Ciprés, Pino, Pumamaqui y Jacarandá (Árboles patrimoniales de Quito, 2018).
- Implementar la siembra de árboles el aceras y parterres, ya sea de especies nativas o exóticas con el fin de crear corredores ecológicos urbanos que sirvan como hogar para aves, insectos, plantas epifitas, etc. evaluando que cada uno desempeña un rol importante en el ambiente (Aragundi *et al.*, 2020).
- Proponer alternativas de urbanismo y arquitectura ecológicos con el fin de diseñar viviendas y edificios con áreas verdes, como: jardines, parques, huertos e incluso como sistemas de ventilación.

Quito cuenta con una ordenanza metropolitana para la protección, fomento y preservación de los bosques urbanos e infraestructura verde, sin embargo, también se deberían

plantear proyectos que tomen en cuenta las oportunidades que brinda la composición de vegetación urbana para potenciar un desarrollo sostenible en Quito, así como:

- Implementación y ejecución de leyes y normativas que ayuden a prevalecer a largo plazo las áreas verdes urbanas, sin que éstas sean retiradas de aceras o parterres para fines constructivos.
- Proponer a propietarios de edificios y casas la plantación de vegetación urbana en sus aceras o parterres, o en su defecto incluir a la vegetación como parte de la fachada de la vivienda.
- Imponer sanciones a los ciudadanos que atenten con la existencia de los árboles en cualquier sitio que cuente con área verde.
- Crear proyectos o campañas de difusión del arbolado urbano de la ciudad destinados al público en general para dar a conocer los árboles que nos rodean junto con sus servicios ecosistémicos con el fin de apropiar a los ciudadanos los espacios verdes.
- Realizar mingas solidarias para el mantenimiento de áreas verdes aledañas a viviendas de personas interesadas en el tema.
- Cobrar a manera de impuesto los servicios ecosistémicos que brinda el arbolado urbano, a fin de concientizar su cuidado.
- Crear alianzas entre el municipio y viveros locales para el desarrollo de plantas nativas de la ciudad para luego ser introducidas en el medio urbano a zonas que no presentan áreas verdes.
- Dar charlas de educación ambiental en casas barriales o instituciones educativas a niños y jóvenes para que conozcan la importancia del arbolado urbano y cuiden de este para su generación y generaciones futuras.

- Crear acciones que ayuden a mantener en protección tanto a un bosque urbano como a un árbol individual, formando comisiones ambientales en barrios que cuenten con una cobertura vegetal amplia.

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES Y PRESUPUESTO PRELIMINAR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El estudio puede llevarse a cabo entre los meses de junio y octubre de 2022 tabla 5.

Tabla 5. Cronograma de actividades

Actividades	Meses (semanas) 2022				
	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
1. Planificación del vuelo/ fase de campo					
Identificación del área de estudio de interés	■				
Alquiler de dron con piloto profesional		■			
Generación del plan de vuelo			■		
Captura de imágenes multiespectrales			■		
2. Procesamiento de imágenes en laboratorio					
Control de calidad de imágenes			■		
Procesamiento y calibración de imágenes			■		
Generación de ortofotos			■		
Procesamiento de imágenes en PCI				■	
Clasificación de píxeles				■	
Aplicación de índices de vegetación				■	
Obtención de resultados				■	
3. Aplicación los resultados					
Identificación de especies forestales				■	
Identificación del estado de salud de la vegetación				■	
Aplicación de propuestas					■
Informe final					■

El presupuesto estimado para el proyecto de investigación se presenta en la tabla 6.

Tabla 6. Presupuesto preliminar

Actividad	Periodicidad	Recursos requeridos	Costo total
Captura de imágenes multiespectrales	Un mes	Vehículo aéreo pilotado de forma remota junto con un piloto, cámara multiespectral de 5 bandas	\$ 10000
Análisis de imágenes multiespectrales, clasificación de la composición vegetal y aplicación de índices de vegetación	Dos meses	Softwares de sistemas de información geográfica, recursos humanos	\$ 8000
Total			\$ 18000
Total, aproximado			\$ 20000

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El uso de RPAS o sistemas aéreos pilotados de forma remota para la captura de imágenes multiespectrales son la forma más económica y eficaz para realizar un monitoreo forestal en un área urbana sobre todo por el paisaje heterogéneo que presentan las ciudades. La identificación

de especies vegetales utilizando firmas espectrales nos permite conocer la diversidad de árboles y plantas que están presentes en la ciudad y adicional a esto poder conocer las funciones ecológicas que cumple cada especie para utilizarlas en provecho a nuestro bienestar y del entorno natural. Aplicar índices de vegetación para conocer el estado de salud de la vegetación es vital para prevenir la pérdida del arbolado urbano en términos de cambio climático, teniendo en cuenta los servicios ecosistémicos que la vegetación urbana brinda. Por otro lado, el implemento de estrategias de protección dirigidas a la gestión del arbolado de la ciudad permite que el sistema socioecológico se dirija a un desarrollo sostenible, mejorando la calidad de vida de los habitantes del Distrito Metropolitano de Quito.

Este tipo de estudio puede complementarse con investigaciones que realizaron fase de campo para verificar si la identificación por programas se relaciona con la identificación taxonómica, también puede complementarse con estudios de otras áreas, como: arquitectura, planificación territorial, urbanismo, ingeniería civil, paisajismo, entre otras.

Para futuras investigaciones relacionadas a este estudio se recomienda realizar una fase de campo para recolectar muestras de vegetación del área de estudio y adicionar como información extra en caso de no identificar completamente la vegetación en el procesamiento de imágenes espectrales, con el fin de generar una base de datos de la vegetación existente en diferentes puntos de estudio. También, se podrían adicionar otros índices de vegetación esta vez que tengan en cuenta el suelo, estrés hídrico, potencial zona de incendios que complementen el NDVI y el EVI. Se deberían incluir más áreas de estudio o puntos de interés para relacionar resultados con respecto a los índices de vegetación. A su vez, se debería considerar realizar estudios que intervengan las áreas urbanas para medir el bienestar humano, pero tomando

indicadores sociales como: cultura, religión, economía, demografía, costo-beneficio del arbolado urbano, entre otros.

REFERENCIAS

- Alvarez, O., & Morales, G. M. (diciembre 2020). *Conferencia 2.3 – Plataformas y sensores* [Archivo PPT - PDF]. ResearchGate.
https://www.researchgate.net/publication/347514911_Conferencia_23_-_Plataformas_y_sensores_PPT
- Andújar, M. M. J. (2017). Sistemas aéreos pilotados de forma remota (RPAS): Historia, sistemas y operaciones. In *Cátedra " Jorge Juan ": ciclo de conferencias: curso 2015-2016* (pp. 29-53). Universidade da Coruña.
- Aragundi, S., Cubillo, P., Aguilera, K. (2020). *Un diagnóstico de la Diversidad y Funcionalidad del Arbolado Urbano de Quito*. En: Moreira, P., Corral, F. (Eds.), Plan Árbol. Fases 2 & 3. Centro de Información Urbana de Quito, CIUQ. Quito, 75 pp.
- Balvanera, P. (2012). Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Ecosistemas*, 21(1-2).
- Bannister, Jan R, Donoso, Pablo J, & Mujica, Rodrigo. (2016). La silvicultura como herramienta para la restauración de bosques templados. *Bosque (Valdivia)*, 37(2), 229-235. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002016000200001>
- Bonnaire, R. L., Montoya, B. B., & Obando-Vidal, F. (2021). Procesamiento de imágenes multiespectrales captadas con drones para evaluar el índice de vegetación de diferencia normalizada en plantaciones de café variedad Castillo. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 22(1).
- Bonilla-Bedoya, S., Mora, A., Vaca, A., Estrella, A., & Herrera, M. Á. (2020). Modelling the relationship between urban expansion processes and urban forest characteristics: An application to the Metropolitan District of Quito. *Computers, Environment and Urban Systems*, 79, 101420.
- Bonilla-Bedoya, S., Estrella, A., Santos, F., & Herrera, M. Á. (2020). Forests and urban green areas as tools to address the challenges of sustainability in Latin American urban socio-ecological systems. *Applied Geography*, 125, 102343.
- Bonilla-Bedoya, S; Alvarado, S; Polo, J; Yépez, J; Vaca, A & Salazar, L (2020). QUITO: CIUDAD DE BOSQUES Y ÁRBOLES. Relación espacial ciudad ecosistemas forestales y catálogo preliminar del arbolado urbano en el Distrito Metropolitano de Quito. Quito, Ecuador: Editorial Universidad Tecnológica Indoamérica.
- Castaño, F. S., Reyes, R. G. J., & Vela, M. A. (1996). La Teledetección: sus bases. *Ensayos: Revista de la Facultad de Educación de Albacete*, (11), 183-194.

- Comisión Nacional Forestal. (22 de noviembre de 2017). Bosques y Cambio Climático. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conafor/documentos/bosques-y-cambio-climatico-23762>
- Chamorro, M. - Falconi, S. (2019). Potencial de secuestro de carbono por los árboles en los parques urbanos de los Distritos de El Tambo, Huancayo y Chilca (Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero en Ciencias Forestales y del Ambiente). Universidad Nacional del Centro del Perú – Facultad de Ciencias Forestales y del Ambiente – Huancayo – Perú.
- Chuvieco, E. (1996). Fundamentos de teledetección espacial (No. 526.982 C564 1996). Ediciones Rialp.
- El Comercio. (2019) La contaminación auditiva en Quito llega a niveles muy altos. <https://www.elcomercio.com/tendencias/contaminacion-auditiva-quito-ambiente-niveles.html>
- Dwyer, J. F., McPherson, E. G., Schroeder, H. W., & Rowntree, R. A. (1992). Assessing the benefits and costs of the urban forest. *Journal of Arboriculture*. 18 (5): 227-234., 18(5), 227-234.
- Díaz, J. (2015). Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de éstos a la agricultura de precisión.
- Durán, G., Martí, M., & Mérida, J. (2016). Crecimiento, segregación y mecanismos de desplazamiento en el periurbano de Quito. *Íconos: Revista de Ciencias Sociales*, (56), 123-146.
- FAO. (2019). Bosques urbanos: un llamado a repensar el futuro de las ciudades. <https://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/1251218/>
- FAO. (2020). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 – Principales resultados. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca8753es>
- FAO y PNUMA. (2020). El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca8642es>
- FAO. (2022). Servicios ecosistémicos y biodiversidad. <https://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/background/culturalservices/es/#:~:text=Los%20beneficios%20no%20materiales%20que,relacionada%20con%20el%20entorno%20natural>.
- García, E., & Flego, F. (2008). Agricultura de precisión. *Revista Ciencia y Tecnología*, 1(8), 99-116.
- Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., & García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de teledetección*, 8(1), 1-10.

- Guerrero, A. (08 de febrero de 2020). *Quito aún tiene zonas con déficit de áreas verdes*. El Comercio. Recuperado en diciembre de 2021 de <https://www.elcomercio.com/actualidad/quito/quito-zonas-deficit-areas-verdes.html>
- Guerrón Barahona, A. M. (2020). Obtención de índices vegetales, a partir de onda roja e infrarrojo cercano, en frutales de la parroquia Tumbaco (Tesis de licenciatura, Quito: UCE).
- Gómez, L. (2020). Relación del verde urbano de Quito y las condiciones socioeconómicas de la población desde una perspectiva de justicia espacial. *Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales*.
- Instituto Geográfico Nacional. (2022). Plan Nacional de Teledetección. <https://pnt.ign.es/satelites-sentinel#:~:text=Sentinel%201.&text=El%20primer%20sat%C3%A9lite%20Sentinel%20D1,3%20de%20abril%20de%202014>.
- Hernández Flores, María de la Luz, Palacios Romero, Abraham, Otazo Sánchez, Elena María, González Ramírez, César Abelardo, Gordillo Martínez, Alberto José, & Mendoza Herrera, Karen Andrea. (2016). Influencia de la urbanización en el cambio de la vegetación colindante del corredor Pachuca-Tizayuca (2000-2014). *Revista mexicana de ciencias forestales*, 7(33), 20-39. Recuperado en 08 de enero de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322016000100020&lng=es&tlng=es.
- Hernández, S. (2017). *Generación de ortoimágenes usando vehículos aéreos no tripulados aplicado a la agricultura* (Bachelor's thesis, Universidad Eafit).
- Kharuf-Gutierrez, Samy, Hernández-Santana, Luis, Orozco-Morales, Rubén, Aday Díaz, Osmany de la C., & Delgado Mora, Irenaldo. (2018). Análisis de imágenes multiespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 39(2), 79-91. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282018000200007&lng=es&tlng=es.
- Koch, B. (2013). La teledetección como apoyo a los inventarios forestales nacionales EFN. Antología de conocimiento para la evaluación de los recursos forestales nacionales. [Documento en línea] Disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/national_forest_assessment/images/PDFs/Spanish/KR2_ES__8_.pdf.
- Lara, A., Urrutia, R., Little, C., & Martínez, A. (2010). Servicios ecosistémicos y ley del bosque nativo: No basta con definirlos. *Revista Bosque Nativo*, 47, 3-9.
- Lara, V. N., & Chamorro, S. H. (2018). Uso De Los Sensores Remotos En Mediciones Forestales. *Eur. Sci. J*, 14.

- Li D, Wu S, Liang Z, Li S, The impacts of urbanization and climate change on urban vegetation dynamics in China, *Urban Forestry and amp; Urban Greening* (2020), doi: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126764>
- Louman, B., & Venegas, G. (2001). *Aprovechamiento con tratamiento silvicultural de impacto reducido en un bosque montano de la Cordillera de Talamanca, Costa Rica* (Vol. 325). CATIE.
- Lozada Toscano, V. L. (2020). Análisis de islas de calor urbano y sus variables en el sur de Quito mediante técnicas de termografía desde vehículos aéreos no tripulados (Tesis de licenciatura, Quito: Universidad Politécnica Salesiana).
- Luna, L. B., Díaz, J. F., & Alcalde, L. H. (2018). La sobrepoblación: efectos. *Revista de Investigaciones de la Universidad Le Cordon Bleu*, 5(2), 119-132.
- Árboles patrimoniales de Quito. (2018). Quito In Trend. <https://quitointrend.com/2018/06/13/522/>
- Martínez Vega, J., Martín, M. P., Díaz Montejó, J. M., López Vizoso, J. M., & Muñoz Recio, F. J. (2010). Guía didáctica de teledetección y medio ambiente.
- MECN (2009). Ecosistemas del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). Publicación Miscelánea No. 6. Serie de Publicaciones del Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales (MECN) - Fondo Ambiental del MDMQ. 1 - 51 pp. Imprenta Nuevo Arte. Quito - Ecuador.
- MicaSense. (2020). Beneficios de las imágenes multiespectrales - Reseña de los métodos de teledetección para la silvicultura [Archivo PDF]. https://micasense.com/wp-content/uploads/2020/10/Forestry_Whitepaper_Spanish.pdf
- Moran, M. (2020). *Ciudades - Desarrollo Sostenible*. Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
- Muñoz Aguayo, P. (2013). Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación.
- Muñoz Tello, M. E., & Vásquez Córdova, E. G. (2020). *Estimaciones del potencial de captura de carbono en los parques urbanos y emisiones de CO2 vehicular en Cuenca, Ecuador* (Bachelor's thesis).
- Murray, S. (1996). Gestión de la influencia de los bosques en las zonas urbanas y periurbanas. *Unasylva*, (185), 38-44.
- NASA. (s.f). *Historia de la teledetección*. http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/histo_td.htm#:~:text=La%20historia%20de%20la%20teledetecci%C3%B3n,fotograf%C3%ADa%20en%20el%20siglo%20XIX.&text=El%20vuelo%20tripulado%20Apolo%209,estudio%20de%20los%20recursos%20terrestres.

- Nowak, D. J., Crane, D. E., Stevens, J. C., Hoehn, R. E., Walton, J. T., & Bond, J. (2008). A ground-based method of assessing urban forest structure and ecosystem services. *Aboriculture & Urban Forestry*, 34 (6): 347-358., 34(6).
- Ortiz, P. (2015). "*Quito Verde*"¿para todos? (Doctoral dissertation, Pontificia Universidad Católica de Chile).
- Pérez, C., & Muñoz, A. L. (2006). Teledetección: nociones y aplicaciones [Archivo Google Books].
<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=SfrGxbO1DT0C&oi=fnd&pg=PA1&dq=que+es+la+teledetecci%C3%B3n&ots=pFifUD2gEW&sig=Wuezwf7UgkUpFreZjGs3FHmXaCg#v=onepage&q=que%20es%20la%20teledetecci%C3%B3n&f=false>
- Pervaiz, S., Javid, K., Khan, F. Z., Talib, B., Siddiqui, R., Ranjha, M. M., & Akram, M. A. N. (2019). Spatial analysis of vegetation cover in urban green space under new government agenda of clean and green Pakistan to tackle climate change. *Journal of Ecological Engineering*, 20(4).
- Posada-Asprilla, W.; Medina-Sierra, M.; Cerón-Muñoz, M. (2019). Estimación de la calidad y cantidad de pasto kikuyo [*Cenchrus clandestinum* (Hochst. ex Chiov.) Morrone] usando imágenes multiespectrales. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 22(1):e1195.
<https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1195>
- Ruiz Pérez, M., & García Fernández, C., & Sayer, J. A. (2007). Los servicios ambientales de los bosques. *Ecosistemas*, 16(3),80-89. ISSN: 1132-6344. Disponible en:
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=54016309>
- Rodríguez García, L., Curetti, G., Garegnani, G., Grilli, G., Pastorella, F., & Paletto, A. (2016). La valoración de los servicios ecosistémicos en los ecosistemas forestales: un caso de estudio en Los Alpes Italianos. *Bosque (Valdivia)*, 37(1), 41-52
- Salazar, M. M., & Páliz, C. F. (2018). El territorio periurbano de la ciudad de Quito: expansión urbana, cambio de la morfología y valor del suelo. Caso de estudio “valle de Los Chillos”, Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador. *Eídos*, 11, 1-26.
- Salazar, E., Henríquez, C., Durán, G., Qüense, J., & Puente-Sotomayor, F. (2021). *How to Define a New Metropolitan Area? The Case of Quito, Ecuador, and Contributions for Urban Planning*. *Land*, 10(4), 413. doi:10.3390/land10040413
- SNIA (2022). Índice de Vegetación Mejorado.
http://dlibrary.snia.gub.uy/maproom/Monitoreo_Agroclimatico/INDICES_VEGETACION/EVI/EVI_250m/EVI.html
- Sacristán, R. F. (2016). La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Revista AquaTIC*, (24).
- Servicio Geológico de los Estados Unidos. (2021). Landsat 8. Earth Observing System.
<https://eos.com/es/find-satellite/landsat-8/>

Servicio Geológico de los Estados Unidos. (2020). NDVI: Preguntas Frecuentes Y Qué Necesita Saber. <https://eos.com/es/blog/ndvi-preguntas-frecuentes/#:~:text=%C2%BFC%C3%B3mo%20Funciona%20El%20NDVI%3F,la%20uz%20infrarroja%20cercana%20reflejada>.

Secretaria de Ambiente. (2022). Arbolado Urbano. <http://www.quitoambiente.gob.ec/index.php/patrimonio-natural/arbolado-urbano>

Secretaria de Ambiente. (2022). Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire. <http://www.quitoambiente.gob.ec/index.php/norma-ecuatoriana-de-la-calidad-del-aire>

Shojanoori, R., & Shafri, H. Z. (2016). Review on the use of remote sensing for urban forest monitoring. *Arboric. Urban For*, 42(6), 400-417.

Tserej, V. O. (s.f.) Estudios ecológicos a nivel de biosfera [Archivo PDF]. https://www.researchgate.net/profile/Olga-Tserej-Vazquez/publication/337925582_Estudios_ecologicos_a_nivel_de_biosfera/links/5df3cb65299bf10bc3599285/Estudios-ecologicos-a-nivel-de-biosfera.pdf