

ISSN: 2600-5921

GEOESPACIAL

-REVISTA-

17/1
2020



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA COELENTO

Volumen 17. Número 1. Enero-Junio 2020

Revista GEOESPACIAL Vol. 17 N°1



Departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE

Revista GEOESPACIAL Vol. 17 N° 1

Revista oficial de difusión científica y tecnológica en el área de las Ciencias y Tecnologías Geoespaciales de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Periodicidad:

La revista Geoespacial es publicada semestralmente

Revista Geoespacial, Volumen 17 N° 1, Enero-Junio 2020

Editor:

Alfonso Tierra

Departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE -Ecuador

Comité Editorial:

Alfonso Tierra

Departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE -Ecuador

Oswaldo Padilla

Departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE - Ecuador

Esthela Salazar

Departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE - Ecuador

Comité Científico:

César Iván Álvarez Mendoza	- Universidad Politécnica Salesiana -EcuadorI- Ecuador
Roberto Luz Teixeira	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE- Brazil
Gustavo Barrantes	- Universidad Nacional de Costa Rica - Costa Rica
Rodrigo Márquez	- Universidad Osorno - Chile
Pascal Podwojewski	- IRD - France
José Luis Carrión Sánchez	- Instituto Geográfico Militar - Ecuador

Preguntas y Correspondencia

Departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Av. Gral. Rumiñahui S/N. Sangolquí – Pichincha – Ecuador. artierra@espe.edu.ec

Los contenidos de los artículos, aquí publicados, son de responsabilidad de los autores.

Revista Geoespacial Vol. 17 N° 1, Enero-Junio 2020

ISSN 2600-5921

Revista GEOESPACIAL 17(1). Enero-Junio 2020

Sumario

Volumen 17 N° 1, 2020

	Pag.
ESTIMACIÓN DE LA HUMEDAD DEL COMBUSTIBLE VIVO USANDO IMÁGENES SENTINEL-2 EN PARCELAS FORESTALES DE LA COMUNIDAD VALENCIANA Karla Freire	1
CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DE ESTRÉS HÍDRICO EN EL CULTIVO DE PEPINO DULCE (<i>Solanum muricatum</i>) Karla Meza, Bryan Ruales, Javier Maiguashca, José Rivadeneira	14
ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL PASTO MEDIANTE NDVI CON IMÁGENES MULTIESPECTRALES DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAV) Izar Sinde, Diana Yáñez, José Grefa, Marcos Arza, Mariluz Gil	25
VALORACIÓN ECONÓMICA DE LOS SERVICIOS AMBIENTALES DEL PARQUE ECOLÓGICO RECREACIONAL LA PERLA Karen Astudillo, Fabián Rodríguez Espinosa	39

ESTIMACIÓN DE LA HUMEDAD DEL COMBUSTIBLE VIVO USANDO IMÁGENES SENTINEL-2 EN PARCELAS FORESTALES DE LA COMUNIDAD VALENCIANA.

ESTIMATION OF THE LIVE FUEL MOISTURE USING SENTINEL-2 IMAGES IN FOREST PLOTS OF THE VALENCIAN COMMUNITY.

Karla Gabriela Freire Quintanilla

E.T.S.I. Geodésica, Cartográfica y Topográfica Universitat Politècnica de València, Camí de Vera, s/n, 46022 València, España, karlit_178@hotmail.com

Recibido: 26 de septiembre de 2019

/Aceptado: 06 de marzo de 2020

RESUMEN

El contenido de agua que tiene la vegetación es un parámetro crítico que afecta la inflamabilidad de la vegetación y el comportamiento del fuego. Dicho parámetro se conoce como humedad del combustible vivo (HCV) y su valor depende de la especie forestal que se esté analizando. Se necesitan estimaciones actualizadas de HCV en las distintas especies forestales para la evaluación del riesgo de incendios forestales. Además, se tiene que estimar la proporción que las especies forestales guardan en cada parcela de muestreo. Sin embargo, el monitoreo detallado y constante de HCV en el campo es costoso y consume mucho tiempo. En el presente trabajo se ha construido un nuevo método de estimación temporal de los valores de HCV en diferentes parcelas forestales de la Comunidad Valenciana. Para ello se utilizaron técnicas de regresión múltiple, usando como predictores diferentes índices de vegetación obtenidos desde enero de 2016 a través de imágenes del satélite Sentinel-2, en un conjunto de píxeles tomados en cada parcela forestal. Dichas parcelas están repartidas por las tres provincias de la Comunidad Valenciana, en las cuales se cuenta con datos mensuales de HCV para las diferentes especies forestales, teniendo en cuenta la proporción que guardan las mismas en la parcela forestal. Los datos de HCV han sido proporcionados por la Dirección de Prevención de Incendios Forestales de la Generalitat Valenciana a través de la empresa pública VAERSA. Para mejorar la precisión de los modelos de regresión de HCV en cada parcela, calculados a partir de los índices de vegetación, se incluyeron variables meteorológicas, extraídas para diferentes periodos de tiempo. Se calculó la estimación del valor de HCV en cada parcela en otros valores de tiempo no usados en la muestra de entrenamiento del modelo de regresión, analizando la capacidad predictiva de los modelos en cada parcela forestal.

Palabras clave: Humedad del combustible vivo; regresión múltiple; Sentinel-2, parcelas forestales; Comunidad Valenciana.

ABSTRACT

The water content in the vegetation is a critical parameter that affects the inflammability of the vegetation as well as its fire behaviour. This parameter is known as live fuel moisture (LFM) and its value depends on the analysed forest species. In order to evaluate the risk of forest fires, updated estimations of LFM are required. Moreover, it is necessary to estimate the proportion that forest species have in each sampling plot. However, detailed and constant monitoring are time and cost intensive. The current research generated a new method, which estimates temporal values of the LFM in various plots,

being located in the Valencian community. Accordingly, multiple regression techniques have been used. The predictors comprise various vegetation indexes, which were generated through the analysis of satellite imagery of each plot obtained by the Sentinel-2 satellite since 2016. These parcels are distributed across three provinces of the Valencian community, in which there have been monthly data of the LFM of the forest species, considering their proportion in the forest parcel. The LFM data have been obtained from the “Dirección de Prevención de Incendios Forestales de la Generalitat Valenciana” through the public enterprise VAERSA. In order to improve the precision of the LFM regression models in each parcel, which were calculated through vegetation indexes, the use of meteorological variables obtained at different time periods was tested. Additionally, the analysis of the predictive capacity of the models in each forest parcel has been achieved by generating the LFM values for each parcel at times different from those employed to build the models.

Keywords: Live fuel moisture; multiple regression, Sentinel-2, forest parcels, Valencian Community.

1. INTRODUCCIÓN

La humedad del combustible vivo es una medida del contenido de agua de la vegetación viva, es un fuerte determinante de la ignición del fuego, la velocidad de propagación y la intensidad (Peterson et al., 2008). Si bien el contenido de humedad de la vegetación muerta puede obtenerse con bastante facilidad a partir de modelos dependientes del clima, ya que los combustibles muertos dependen de la variabilidad atmosférica, estimar el contenido de humedad de la vegetación viva es más complicado porque depende de las propiedades fisiológicas que pueden variar entre las diferentes especies de plantas. Para cuantificar el contenido de humedad de la vegetación viva, la humedad del combustible vivo se define como la relación porcentual de la diferencia entre el peso húmedo y el peso seco de una muestra de vegetación (Boksoon et al., 2018).

Estudios previos ha determinado metodología para la obtención de la humedad de combustible vivo, por ejemplo el estudio realizado en el trabajo de fin de master denominado “Análisis de la Humedad del Combustible Vivo (HCV) en la Comunitat Valenciana y la influencia de las variables meteorológicas” (Soriano Sancho & Quilez-Moraga, 2017), obteniendo el peligro de incendios forestales según la clasificación de niveles de HCV, bajo: mayor que 120%, moderado: entre 80% y 120%, alto: entre 60% y 80%, y crítico; menor del 60%. La mayor parte de especies en la Comunidad Valenciana presentan valores de humedad que se establecen entre 75-100% un umbral que está por debajo de los incendios más devastadores, aunque este valor depende de la época del año que se considere y también puede variar de un año a otro.

En la actualidad, la cobertura espacial y el muestreo temporal de los datos de HCV están muy limitados ya que el trabajo de campo para las mediciones de HCV requieren mucho esfuerzo. La humedad de combustible vivo se mide de manera manual semanalmente, quincenalmente o mensualmente en un número limitado de sitios de muestreo. Por ejemplo, la Dirección de Prevención de Incendios Forestales de la Generalitat Valenciana a través de la empresa pública VAERSA generalmente toma muestras de HCV en 18 sitios de la Comunidad Valenciana una vez al mes y en diferentes especies forestales, dejando vacíos de datos en áreas donde el clima y las variaciones geofísicas pueden afectar sustancialmente la HCV.

Un posible enfoque para superar las limitaciones espaciales y temporales de las mediciones manuales de HCV es utilizar índices de vegetación (IVeg) derivados de datos satelitales. Estudios previos demuestran la capacidad de los datos de sensores remotos para la estimación de HCV (Boksoon et al., 2018). Según el tipo de sensor utilizado, se encuentran disponibles diferentes resoluciones espectrales, espaciales y temporales. MODIS es uno de los

sensores ópticos más utilizados debido a su alta resolución temporal, proporcionando información espectral en una resolución espacial aproximada lo que limita su uso en áreas de muestreo a pequeña escala o con vegetación muy heterogénea. Otros autores evaluaron el potencial de los sensores remotos por microondas como una alternativa para la estimación de HCV (Marino et al., 2018). Aun se necesita más investigación para proporcionar modelos operacionales y herramientas para la predicción precisa de HCV.

La nueva generación de sensores SENTINEL-2 proporcionan información espectral con una resolución espacial alta, este satélite transporta un solo instrumento multiespectral (MSI) con 13 canales espectrales. La resolución varía entre 10 y 60 m. Las bandas visible y de infrarrojo cercano (NIR) tienen 10 m de resolución, las bandas de borde rojo de vegetación y las bandas de infrarrojo de onda corta (SWIR) tienen 20 m de resolución, y el resto de las bandas tienen una resolución de 60 m (Agency, 2015), lo que ofrece la oportunidad de mejorar las estimaciones de HCV para fines operativos, pero solo se ha probado su aplicación en unos pocos trabajos (Marino et al., 2018).

Físicamente, los HCV dependen de índices meteorológicos, la humedad del suelo, la evapotranspiración y la fisiología de las plantas (Soriano Sancho & Quilez-Moraga, 2017). Sin embargo, los IVeg recuperados de las mediciones de sensores remotos satelitales están relacionadas con el verdor de la superficie y la biomasa de la vegetación representada por el índice de área de la hoja verde (LAI), que se ven afectadas y por lo tanto correlacionan con el HCV. Los IVeg y HCV son variables interdependientes con tendencias interanuales similares, lo que insinúa una posible estimación de HCV a partir de IVeg (Argañaraz et al., 2016).

No obstante, también existen diferencias entre ellos, el crecimiento de las plantas requiere no solo de la humedad, sino también de la temperatura y precipitación y estos índices meteorológicos también pueden variar durante el desarrollo de las diferentes especies de plantas. Por tanto, para recuperar la HCV de los datos de IVeg, es necesario realizar una investigación cuidadosa de las características de IVeg utilizando en conjunto los datos de mediciones in situ y satelitales.

El objetivo de este trabajo es valorar la capacidad del satélite Sentinel-2, para la estimación de HCV mediante estudios de modelos de regresión. La investigación se centra en diferentes especies forestales representativas del matorral y arbóreo que se encuentran comúnmente en áreas mediterráneas propensas a incendios, y han sido identificadas como especies indicadoras para la evaluación del riesgo de incendios forestales. Cada especie forestal cuenta con su valor de HCV por lo que es necesario calcular la media ponderada de humedad de combustible vivo de las especies que se encuentran un área específica por medio de diferentes criterios que se tomaran en cuenta a lo largo del presente trabajo.

2. LOCALIZACION DEL ESTUDIO

El presente estudio se realiza en la Comunidad Valenciana, situada en el este de la península Ibérica, cuenta con una superficie de 2.325.500 ha, según el Instituto Cartográfico Valenciano, esta zona cuenta con una superficie forestal de 1.319.517 ha, lo que supone el 57% del territorio total. Esta superficie cuenta con una clasificación de cobertura vegetal definidos por el Plan de Acción Territorial Forestal de la Comunidad Valenciana (PATFOR, 2011), son 23 los ecosistemas forestales (Imagen 1), 10 de los ecosistemas pertenecen a arbolado, 12 a no arbolados y uno a mixto. De los ecosistemas destaca los pinares de *Pinus halepensis* perteneciente al arbolado y la garriga que es una especie arbustiva cuya especie es *Quercus coccifera* perteneciente al no arbolado.

La empresa Valenciana de Aprovechamiento Energético de Residuos, SA (VAERSA) perteneciente a la Conselleria de Agricultura, Medio Ambiente, Cambio Climático y Desarrollo

Rural, localiza una serie de puntos de muestreo donde se toman muestras combustibles de las especies forestales más representativas de la zona, con el fin de obtener una elevada representatividad respecto al territorio. Se localiza un total de 18 puntos de muestreo (Imagen 1). Estos puntos de muestreo son representativos de la zona en cuanto a especies, estratos de vegetación y estructura del combustible. También se consideró los aspectos climáticos, topográficos y de accesibilidad.

La Tabla 1 muestra las especies que se toma en cada punto de muestreo por VAERSA de enero del 2016 a julio del 2018, la elección de las especies sigue la premisa de representatividad en los ecosistemas forestales, se toma muestras de un total de 19 especies distintas típicas de los montes mediterráneos. Se recoge un total de 125 muestras de vegetación en cada toma de muestra repartidas en los 18 puntos de muestreo, VAERSA recoge la muestra de las especies forestales una vez al mes y en ciertos puntos de muestreo en los meses de verano lo hace quincenalmente.

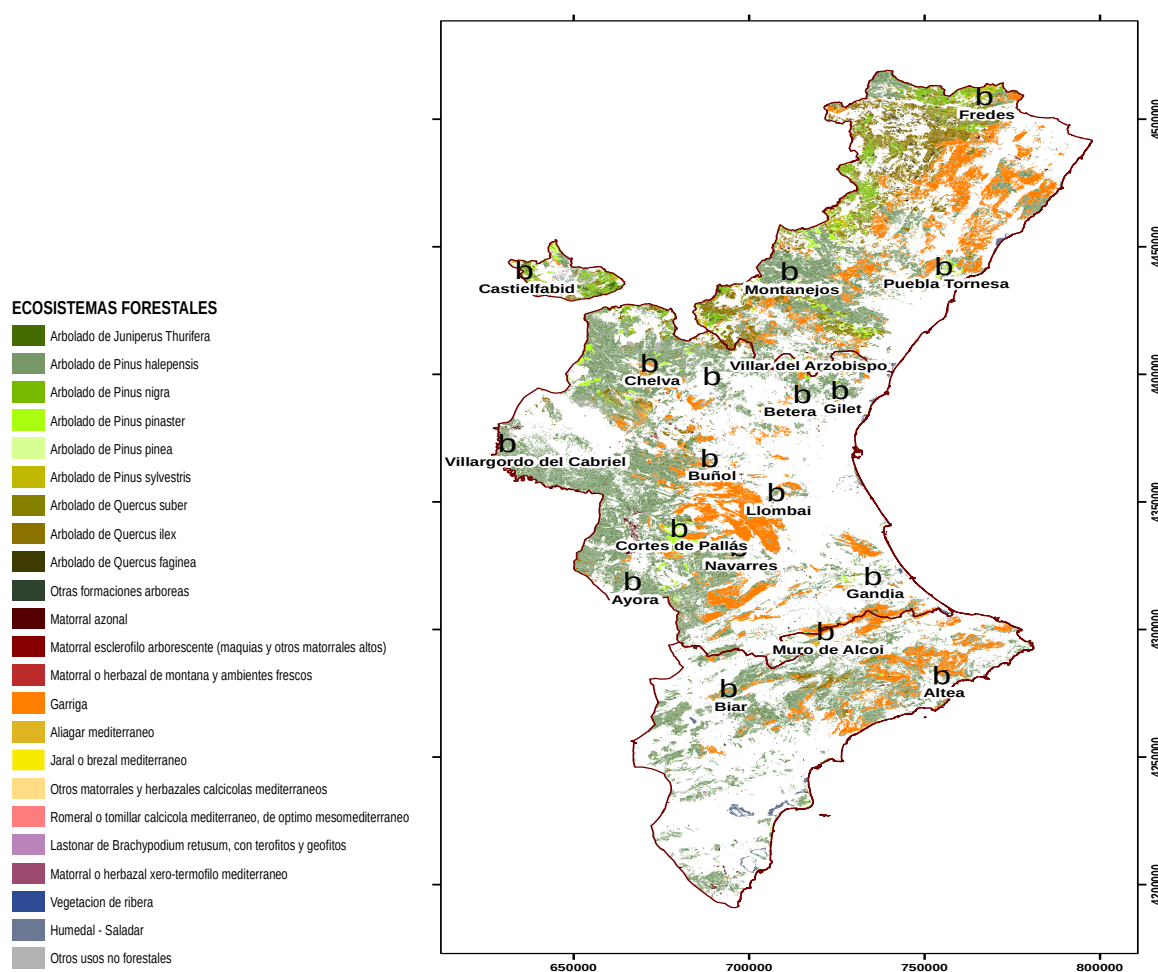


Imagen 1. Ecosistemas forestales de la Comunidad Valenciana y localización de los puntos de muestreo.
Fuente: VAERSA

Tabla 1. Especies muestreadas en 18 parcelas de la Comunidad Valenciana.

Fuente: VAERSA.

Nº	Punto de Muestreo	Ph	Qc	Qi	Ro	Up	Em	Ca	Pp	Pn	Ps	Jo	Jc	Jt	Jph	Pl	Cs	St	Au	Ra	Total
1	Fredes			x	x	x				x	x	x			x						7
2	Puebla Tornesa	x	X		x	x	x		x			x				x					8
3	Montanejos	x	X		x	x						x			x	x				x	8
4	Castielfabid			x	x					x			x	x							5
5	Chelva	x	x	x	x	x												x			6
6	Villar del Arzobispo	x	x		x		x					x			x						6
7	Betera	x	x		x	x	x					x				x		x			8
8	Gilet	x	x		x		x					x				x					6
9	Villargordo del Cabriel	x	x		x							x			x			x	x		7
10	Buñol	x	x		x	x	x	x				x					x				8
11	Llombai	x	x		x	x	x					x				x	x				8
12	Cortes de Pallás	x	x	x	x	x		x	x			x									8
13	Navarrés	x	x		x	x	x					x									6
14	Ayora	x	x	x	x	x												x			6
15	Gandia	x	x	x	x	x	x		x							x					8
16	Muro de Alcoi	x	x	x	x	x		x				x				x					8
17	Altea	x	x		x	x	x									x	x				7
18	Biar	x			x	x						x			x						5
	Total	16	15	7	18	14	9	3	3	2	1	13	1	1	5	8	3	4	1	1	125

Nota: correspondencia entre abreviaturas y nombre de las especies: **Ph**(*Pinus halepensis*); **Qc** (*Quercus coccifera*); **Qi**(*Quercus ilex*); **Ro**(*Rosmarinus officinalis*); **Up**(*Ulex parviflorus*); **Em**(*Erica multiflora*); **Ca**(*Cistus albidus*); **Pp**(*Pinus pinaster*); **Pn**(*Pinus nigra*); **Ps**(*Pinus sylvestris*); **Jo**(*Juniperus oxycedrus*); **Jc**(*Juniperus communis*); **Jt**(*Juniperus thurifera*); **Jph**(*Juniperus phoenicea*); **Pl**(*Pistacea lentiscus*); **Cs**(*Ceratonia siliqua*); **St**(*Stipa tenacissima*); **Au**(*Arbutus unedo*); **Ra** (*Rhamnus alaternus*)

3. DATOS Y MÉTODOS

3.1. HUMEDAD DE COMBUSTIBLE VIVO PARA LAS ESPECIES FORESTALES.

El análisis de HCV que contiene cada especie vegetal detallada en la Tabla 1 es primordial, ya que forma parte de los ecosistemas forestales endémicos de la Comunidad Valenciana, mismos que al ser afectados por factores externos como su estado fenológico, variables meteorológicas a más del relieve y el suelo, presentan una mayor o menor deshidratación a lo largo del tiempo, existiendo la probabilidad de que dichas especies presenten características de un componente combustible, considerándose como un parámetro del comportamiento de los incendios forestales. La humedad de combustible vivo varía según la especie forestal y el tiempo en que se realice el muestreo.

El cálculo de la media ponderada de HCV para cada punto de muestreo se realiza a partir de la fracción de cabida cubierta (FCC) es decir la parte de suelo ocupado por la proyección de las copas de la vegetación, siendo diferente para cada punto de muestreo, VAERSA nos ha proporcionado dichos datos para el cálculo de la media ponderada de HCV. La mayoría de las especies forestales tienen una espesura incompleta al ser arbolados y matorrales es decir que no existirá tangencia entre sus copas y la distancia entre ellas será superior al diámetro medio de sus copas.

La Imagen 3 muestra la proporción de fracción de cabida cubierta que hay en cada punto de muestreo, hay un gran porcentaje de Ro (*Rosmarinus officinalis*), Ph (*Pinus Halepensis*) y Qc (*Quercus coccifera*) siendo las más predominantes. La obtención de la media ponderada de HCV en cada punto de muestreo y para cada fecha se obtiene a partir de la suma del producto de HCV de cada especie y su FCC esto dividido para la suma de FCC.

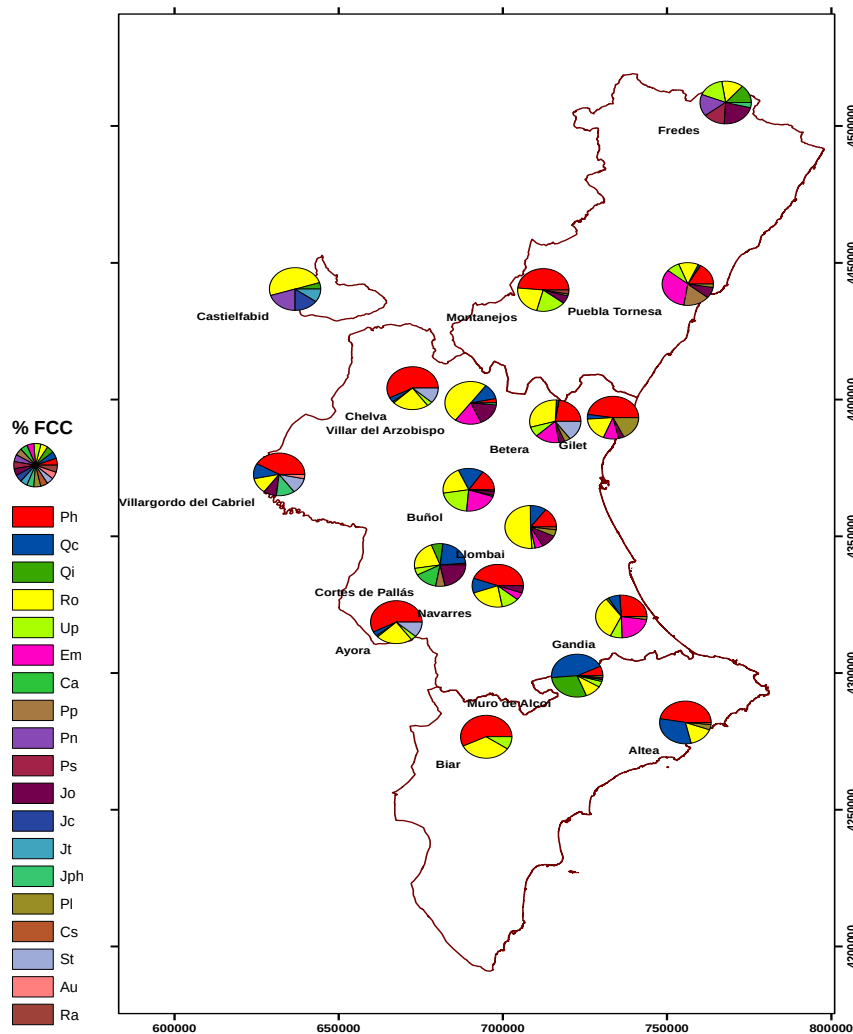


Imagen 2. Porción de FCC de las especies forestales en los puntos de muestreo.

3.2. INDICES DE VEGETACIÓN

Los índices de vegetación (IVeg) son desarrollados con la finalidad de obtener información sobre las características y estado de la vegetación, estos son calculados partiendo de datos espectrales adquiridos desde imágenes satelitales. Los IVeg aprovechan el comportamiento específico radiométrico de la vegetación sana en las diferentes bandas espectrales, especialmente entre el visible y el infrarrojo cercano; el visible perteneciente a la banda roja, muestra los pigmentos de la hoja que absorben la mayor parte de la energía que reciben, estas sustancias afectan en menor fracción al infrarrojo cercano. Estos contrastes son los que aprovecha los IVeg para establecer diferencias en la vegetación, sana y vigorosa, cuando los contrastes son mayores, y vegetación enferma o de baja densidad, cuando los contrastes son menores (Carvacho et al., 2010).

El satélite Sentinel-2 ofrece imágenes de libre disposición, obteniendo series de datos temporales con resoluciones espaciales buenas y densas ampliando su uso en varios campos; por tal razón se realiza la recopilación de imágenes satelitales pertenecientes a la Comunidad Valenciana en el periodo de enero del 2016 a julio del 2018 con el fin de obtener el cálculo de diferentes índices de vegetación en dicho periodo y relacionarlos con la media ponderada de humedad de combustible vivo en 18 puntos de muestreo.

3.2.1. Adquisición de imágenes satelitales.

La descarga de imágenes Sentinel-2 se realizó desde la página web de Copernicus (COPERNICUS, 2018). Al estar los 18 puntos de muestreo distribuidos por toda la Comunidad Valenciana se descargó siete escenas de imágenes satelitales que cubren todos los puntos de muestreo y de cada escena una por cada mes en el periodo de tiempo antes mencionado.

3.2.2. Corrección atmosférica de imágenes satelitales con Sen2cor.

Las imágenes satelitales descargadas pasaran por el software SNAP mediante su extensión SEN2COR el cual pasará a las imágenes del nivel de producto L1C a L2A realizando la corrección atmosférica, del terreno y del cirro de los datos de entrada. Crea imágenes de reflectancia corregidas en el terreno y en el cirro; Grosos ópticos de aerosol adicionales, vapor de agua, mapas de clasificación de escena e indicadores de calidad para las probabilidades de nubes y nieve. El formato del producto de salida es equivalente al Producto de Usuario de Nivel 1C: imágenes JPEG 2000, y se obtiene tres resoluciones diferentes, 60, 20 y 10 m. (European Space Agency, 2018). Como resultado se obtiene unas imágenes más nítidas y con valores de píxel corregidos.

3.2.3. Generación de índices de vegetación.

Una vez procesadas las imágenes satelitales se procede a generar 6 índices de vegetación comúnmente utilizados para estimar HCV por varios autores, la mayor parte de estos índices miden las variaciones de verdor, mismas que pueden estar relacionadas indirectamente con el contenido de agua de la hoja ya que las variaciones de humedad de la vegetación afectan la actividad de la clorofila, la estructura interna de la hoja y el índice de área foliar (LAI) de la vegetación.

Tabla 2. Índices espectrales usados para estimar HCV con Sentinel-2.

ÍNDICE DE VEGETACIÓN	FÓRMULA	REFERENCIA
Índice de vegetación normalizado (NDVI)	$NDVI = \frac{NIR - ROJO}{NIR + ROJO}$	(Rouse Jr., 1973)
Índice de vegetación mejorado (EVI)	$EVI = 2.5 \frac{NIR - ROJO}{NIR + 6 * ROJO - 7.5 * AZUL + 1}$	(Huete A. R., 1997)
Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)	$SAVI = \frac{1.5 * (NIR - ROJO)}{NIR + ROJO + 0.5}$	(Huete A. , 1988)
Índice de diferencia de agua normalizada (NDWI)	$NDWI = \frac{Verde - NIR}{Verde + NIR}$	(McFeeters, 1996)
Índice de resistencia atmosférica visible (VARI)	$NDWI = \frac{Verde - Rojo}{Verde + Rojo - Azul}$	(Tello et al., 2017)
Índice de vegetación verde (VIGreen)	$VIGreen = \frac{Verde - Rojo}{Verde + Rojo}$	(Tucker et al., 1978)

Se procede con la obtención de los 6 índices de vegetación para los 18 puntos de muestreo en análisis, al tener como dato la coordenada de donde se realizó el muestreo de las especies forestales se procede a sacar la media de cada índice de vegetación en un radio de 30 metros es decir se tomarán los nueve píxeles que se encuentren rodeando al punto de muestreo, este proceso se lo realizó mediante el desarrollo de un script en Python.

Los datos calculados de IVeg pertenecen a la fecha de toma del satélite de la imagen, por tal razón, se realiza una interpolación de los datos para obtener los mismos en la fecha de

muestreo en campo por VAERSA.

Los índices de vegetación antes mencionados están relacionados con la media ponderada de HCV, ya que han sido desarrollados con la finalidad de obtener información sobre el estado de la vegetación y las características de la mismas, entregando así la estimación de la calidad y desarrollo de la planta.

3.3. DATOS METEOROLOGICOS

La fenología de las especies forestales depende del estado meteorológico del ecosistema, obteniendo así el desarrollo de las plantas relacionado a los parámetros ambientales. Por tal motivo se realiza la recopilación de datos de variables meteorológicas (precipitación, temperatura, humedad relativa, viento, levante y punto del rocío), con el fin de relacionarlos con la humedad de combustible vivo y los índices de vegetación.

Para ello se hace uso de los datos meteorológicos de las estaciones cercanas a los 18 puntos de muestreo, dichos datos se recopilan de las estaciones pertenecientes a entidades gestoras: Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA).

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se estima los valores de HCV a lo largo del tiempo usando los perfiles temporales de los índices de vegetación derivados de las imágenes satelitales Sentinel-2. Se utiliza la regresión múltiple para evaluar el potencial de cada índice de vegetación para la estimación de HCV en cada punto de muestreo, analizando así el rendimiento de la información espectral derivada de Sentinel-2.

Las métricas de evaluación de los modelos generados para cada punto de muestreo incluyen los coeficientes de determinación (R^2), el error absoluto medio (MAE) y el error cuadrático medio (RMSE). El valor R^2 ajustado se utiliza para comparar la bondad de ajuste entre modelos con diferentes variables de entrada.

A partir de los datos mensuales de dieciocho puntos de muestreo repartidos homogéneamente en la Comunidad Valenciana desde enero del 2016 a julio del 2018 se calcula el modelo de regresión múltiple para cada uno de los puntos de muestreo considerando como variable dependiente la humedad de combustible vivo y como variables independientes los índices de vegetación y sus respectivos polinomios de segundo grado con el fin de mejorar los modelos, la variable cuadrática hace que el modelo mejore, mostrando que su variable es estadísticamente significativa.

Dicho análisis también se desarrolla con las variables meteorológicas con el fin de mejorar la bondad de ajuste y obtener mejores resultados.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. ANÁLISIS ENTRE LA MEDIA PONDERADA DE LA HUMEDAD DE COMBUSTIBLE VIVO Y LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN.

Al modelar la relación existente entre la media ponderada de HCV de las especies forestales más representativas de la Comunidad Valenciana y los índices de vegetación correspondientes a los 18 puntos de muestreo, se obtiene cuáles son las variables independientes es decir índices de vegetación que están relacionadas con la variable dependiente (HCV) obteniendo un proceso estadístico para estimar la relación entre ellas. Los valores R^2 ajustada se utilizaron para evaluar la bondad del ajuste para las parcelas muestreadas, este estadístico

redujo el efecto de variables explicativas adicionales que inflan automáticamente la métrica R^2 . Se alcanzó los modelos para cada punto de muestreo obteniendo los mejores resultados de R^2 ajustada para Gandia (55.31%), Gilet (55.42%), Castielfabid (57.36%) y Muela Cortes (65.83%), este último con el R^2 ajustada mayor se debe a que en dicho punto de muestreo cuenta con menos observaciones y la variación depende de menos factores. Los valores de R^2 ajustada no son tan altos por lo que las estimaciones no se ajustan bien a las variables reales en cada punto de muestreo. Los modelos que menos explican a las variables reales son Ayora y Alcoy con un 11.50 y 11.76% respectivamente, además en el punto de muestreo Chelva no se obtuvo ningún modelo estadísticamente significativo.

Los índices de vegetación NDVI y NDWI son los predictores que aparecen en una gran cantidad de los modelos calculados, el modelo del punto de muestreo Gandia es el que abarca más variables de índices de vegetación y es uno de los modelos que explica mejor a la variable real.

La Imagen 3 muestra los resultados de R^2 ajustada para los modelos de regresión lineal múltiple calculados para relacionar la media ponderada de HCV y las variables de índices de vegetación.

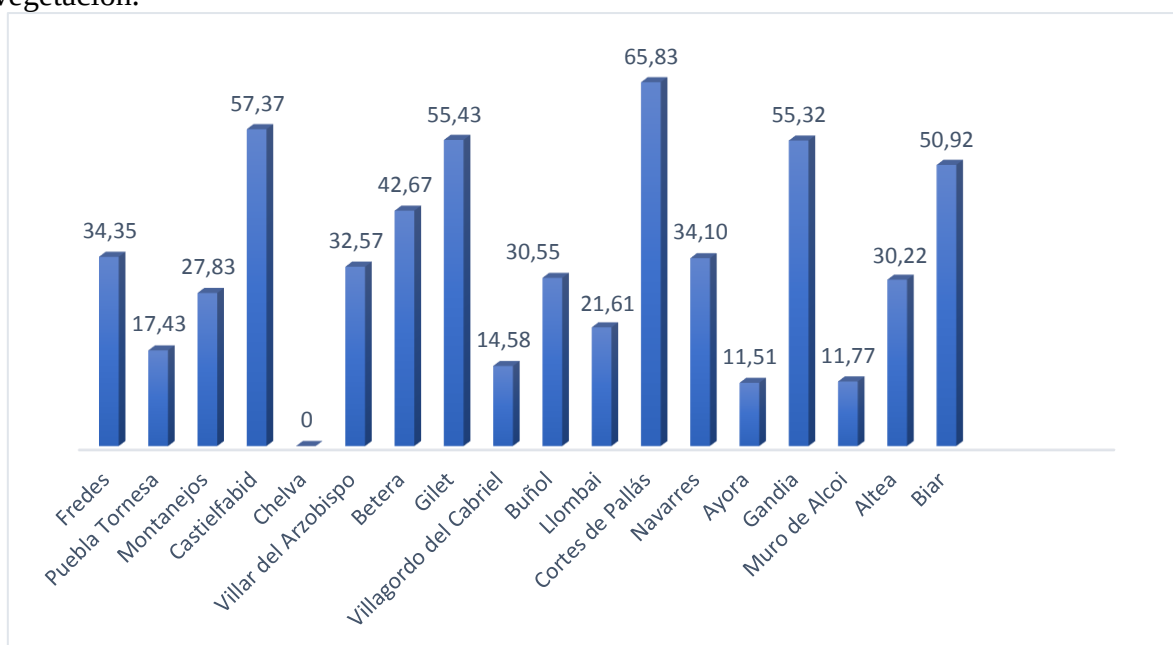


Imagen 3. Gráfica de resultados de R^2 ajustada para los modelos relacionados entre HCV e IVeg.

En el modelo del punto de muestreo Castielfabid se obtiene un R^2 ajustada de 57.37%, la Imagen 4 muestra los datos estimados por el modelo, en su mayoría se ajustan a la tendencia de los datos reales. La estimación del dato de HCV para julio del 2017 es el único que difiere de la tendencia, este desfase se debe a que los índices de vegetación cambian de una manera considerable en comparación con las otras fechas de muestreo perteneciendo este a verano, entregándonos así el modelo calculado un dato fuera de rango.

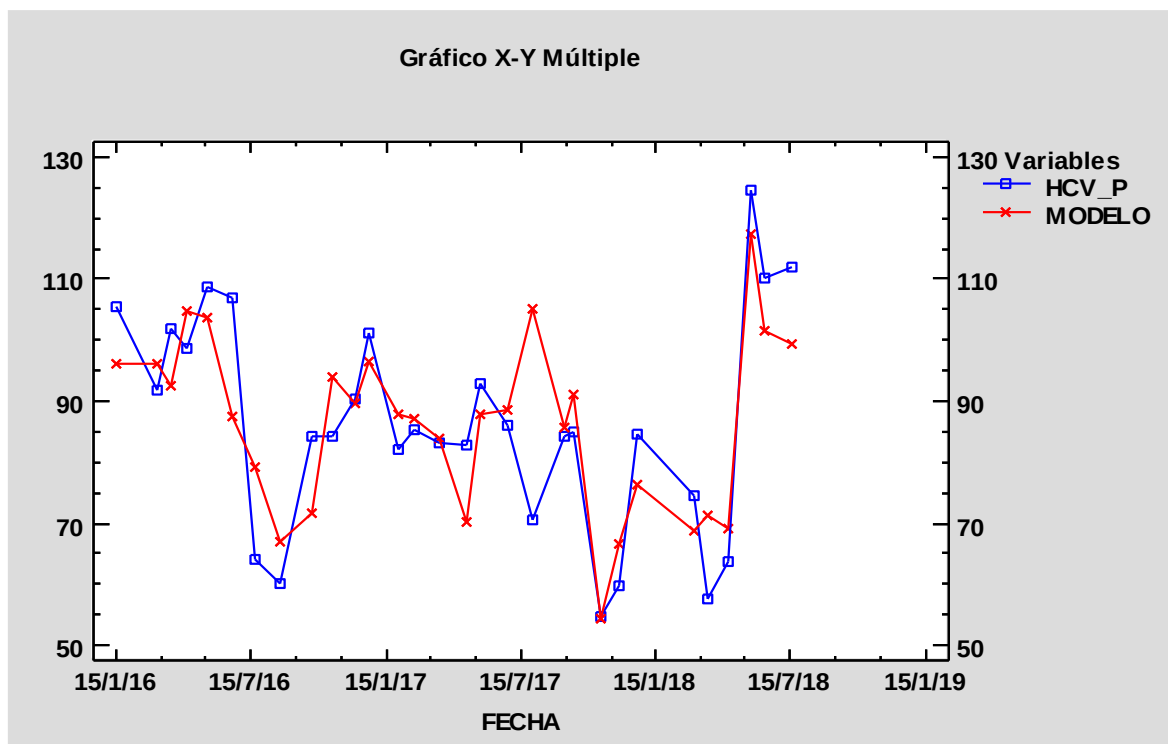


Imagen 4. Gráfica ajuste del modelo para índices de vegetación en el punto de muestro Castielfabid.

4.2. ANÁLISIS ENTRE LA MEDIA PONDERADA DE LA HUMEDAD DE COMBUSTIBLE VIVO Y LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN MÁS LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS.

Al modelar la relación existente entre la media ponderada de HCV, los índices de vegetación y las variables meteorológicas correspondientes a los 18 puntos de muestreo, se observa que en todos los casos el R^2 ajustada son mayores al 90% a excepción de Villargordo de Cabriel y Puebla Tornesa, con R^2 ajustada de 56.95% y 84.20% respectivamente. Los valores de la bondad de ajuste son altos por lo que las estimaciones se ajustan bien a las variables reales en cada punto de muestreo a excepción de Villargordo de Cabriel.

Las variables predictoras que contribuyen significativamente a los modelos pertenecen al grupo de índices de vegetación y a las meteorológicas en los 18 puntos de muestreo. Siendo las variables meteorológicas las que contribuyen significativamente y existiendo por lo menos una variable de índice de vegetación como es el caso de Villargordo de Cabriel y Muro de Alcoi.

La Imagen 5 muestra los resultados de R^2 ajustada para los modelos de regresión lineal múltiple calculados para relacionar la media ponderada de HCV y las variables de índices de vegetación más las variables meteorológicas. El mejor modelo en este caso es el obtenido para el punto de muestreo Betera el cual llega a un R-cuadrada ajustada de 99.998%, el cual se ajusta con 20 variables predictoras, 2 pertenecientes a índices de vegetación (EVI y VIgreen) y 18 variables meteorológicas (P3, P7, P15, P30, P60, Tmax7, Tmax15, Tmax30, Tmedia3, Tmedia7, Tmedia15, HRmax3, HRmax7, HRmax15, HRmin3, HRmin7, HRmin15, Vmax3) pertenecientes al grupo de precipitación, temperatura, humedad relativa y viento.

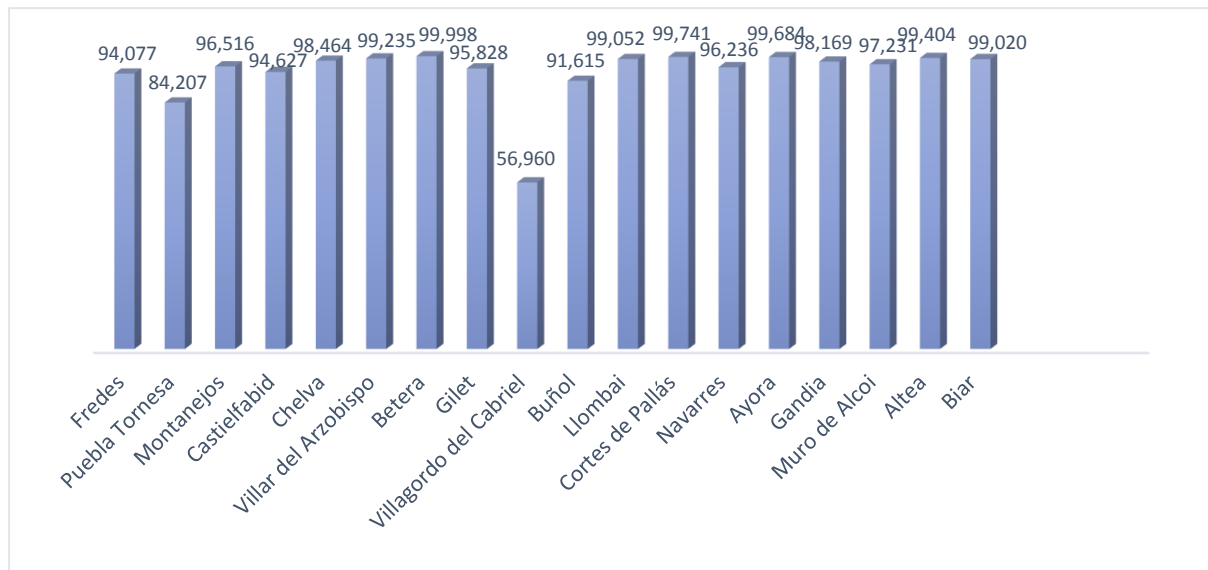


Imagen 5. Gráfica de resultados de R-cuadrada ajustada para los modelos relacionados entre HCV, IV y variables meteorológicas.

En el modelo del punto de muestreo Chelva entre HCV e IVeg no obtuvo ningún modelo estadísticamente significativo, al incluir en los análisis variables meteorológicas vuelven a ingresar todas las variables independientes y hace que los datos de índices de vegetación sean significativos y aporten al modelo. En la Imagen 6 se observa como en los meses de verano del 2016 se producen oscilaciones entre las medidas de HCV ya que los muestreos se realizaban dos veces por mes existiendo diferencias entre ellas, el modelo se logró ajustar con un R^2 ajustada de 98.46%, a pesar de las oscilaciones el modelo en los meses de julio, julio y agosto del 2016, se adapta a los valores ya que las variables meteorológicas actúan de la misma manera para dichas fechas, la precipitación acumulada para los últimos tres días sube y baja al igual que la HCV y de la misma manera las temperaturas máximas y medias, teniendo una relación muy importante entre las variables.

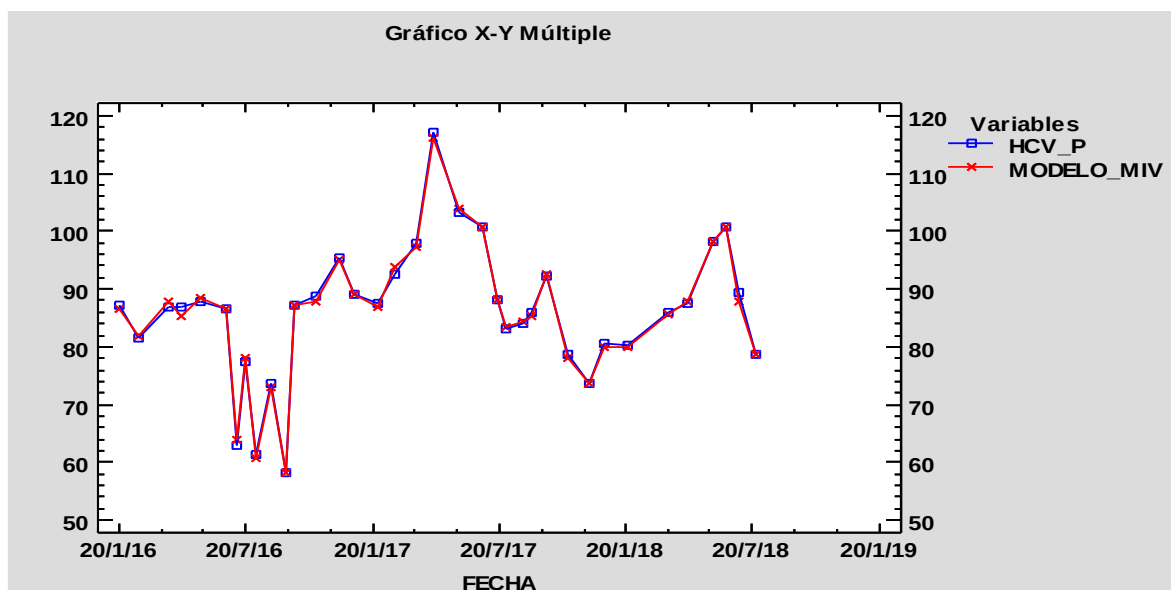


Imagen 6. Gráfica ajuste del modelo con índices de vegetación y variables meteorológicas en el punto de muestro Chelva.

4.3. ESTIMACIÓN DEL VALOR DE LA MEDIA PONDERADA DE HCV CON LOS MODELOS DE REGRESIÓN UTILIZANDO EL INTERVALO DE CONFIANZA.

Una vez que se ha realizado el análisis y se ha generado los modelos de regresión lineal múltiple, es posible predecir la media ponderada de HCV, es importante recalcar que toda predicción tiene asociado un error y por lo tanto un intervalo de confianza considerándolo del 95%. Se comprobó que los HCV están dentro del intervalo de confianza de cada modelo generado; de los 18 puntos de muestreo, Fredes, Montanejos y Castielfabid son los modelos que a pesar de tener un R cuadrada ajustada mayor a 90% dos de sus valores de HCV no ingresan en el rango de intervalo de confianza y Puebla Tornesa y Villargordo del Cabriel al tener una bondad de ajuste menor al 90% tiene más datos de HCV que no ingresan al rango. Con este análisis el modelo que no se lo considera bueno pertenece al punto de muestreo Villargordo del Cabriel ya que tiene un R^2 ajustada de 56% y la mitad de los valores de HCV se quedan fuera del rango de confianza del modelo generado.

5. CONCLUSIONES

El muestreo temporal de los datos de HCV está muy limitado por el trabajo de medición en campo. Para superar las limitaciones espaciales y temporales se han utilizado índices de vegetación derivados del sensor Sentinel-2 y variables meteorológicas pertenecientes a estaciones cercanas a los puntos de muestreo.

Los índices de vegetación están relacionados con el verdor de la superficie y la biomasa de la vegetación, por lo tanto, se correlacionó con HCV. La HCV también depende físicamente de la humedad, temperatura y precipitaciones, siendo variables meteorológicas que varían durante el desarrollo de la planta. Fue necesario añadir al estudio dichas variables y analizar la relación en conjunto con los índices de vegetación, obteniendo mejores modelos para la estimación, con R^2 ajustadas mayores al 90% en todos los puntos de muestreo a excepción de Villargordo y Puebla Tornesa con una bondad de ajuste de 56 y 84% respectivamente. Las variables predictoras al relacionarse entre sí hacen que contribuyan de una manera significativa a los modelos.

Las variables de índices de vegetación más influyentes en los modelos son NDVI y EVI siendo los que mejor estiman la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación, sin embargo, los otros cuatro índices también contribuyen a las regresiones aportando por lo menos a un punto de muestreo. Las variables meteorológicas precipitación, temperatura, humedad relativa y viento son los predictores que más contribuyen a los modelos; son pocos los puntos de muestreo (Montanejos, Puebla Tornesa, Buñol, Muro de Alcoi, Altea y Biar) en que las variables de levante y punto del rocío aportan significativamente siendo las variables que menos relación tiene con el HCV.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio es parte de una investigación más amplia realizada dentro del marco del proyecto Análisis de la humedad del combustible vivo en la Comunitat Valenciana, de la empresa VAERSA con la autorización de la Generalitat Valenciana y la colaboración mantenida con la Dirección General de Incendios Forestales de la Generalitat Valenciana. La participación del Dr. Ángel Antonio Balaguer Beser como apoyo desde la Universitat Politècnica de Valencia y José Luis Soriano Sancho de la empresa VAERSA.

REFERENCIAS

- Argañaraz, J., Landi, M. A., Bravo, S. J., Gavier-Pizarro, G. I., Scavuzzo, C. M., IEEE, & Bellis, L. M. (2016). Estimation of Live Fuel Moisture Content From MODIS Images for Fire Danger Assessment in Southern Gran Chaco. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(12)(DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2575366), 5339-5349.
- Boksoon, M., Seung Hee, K., Shenyue, J., Kristen, W., & Menas C, K. (2018). Estimating Live Fuel Moisture from MODIS Satellite Data for Wildfire Danger Assessment in Southern California USA. *Remote Sensing*, 10(1), 87-107.
- Carvacho Bart, L., & Sánchez Martínez, M. (2010). Comparacion de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile, en el período 2001-2005. *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos.*, 728-737.
- COPERNICUS, E. (2018). *Copernicus Open Access Hub*. Obtenido de <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- Huete, A. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309.
- Huete, A. R. (1997). A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59 (3), 440-451.
- Marino, E., Guillén, C., Nur, A., Tomé, J., & Hernando, C. (19 de 11 de 2018). Estimation of live fuel moisture content of shrubland using MODIS and Sentinel-2 images. *AdvAnces in Forest Fire Research*, 2018-226.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432.
- PATFOR. (2011). *Conselleria de Agricultura Medio Ambiente, Cambio Climatico y Desarrollo Rural*. Obtenido de Plan de Acción Territorial Forestal de la Comunitat Valenciana : <http://www.agroambient.gva.es/es/web/medio-natural/patfor>
- Peterson, S. H., Roberts, D. A., & Dennisin, P. E. (2008). Mapping live fuel moisture with MODIS data: A multiple regression approach. *Remote Sensing of Environment* 112, 4272–4284.
- Rouse Jr., J. (1973). *Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation*. Maryland: Goddard Space Flight Center.
- Soriano Sancho, J., & Quilez-Moraga, R. (21 de 06 de 2017). Análisis de la humedad del combustible vivo en la Comunitat Valenciana. *Actas del 7º Congreso Forestal Español.* , (págs. ISBN: 978-84-941695-2-6). Cáceres (España).
- Tello, J., Gómez-Báguena, R., & Casterad, M. (2017). Comparación y ajuste en zonas agrícolas de índices de vegetación derivados de. *Nuevas plataformas y sensores de teledetección. XVII Congreso de la Asociación Española de Teledetección.*, 81-84.
- Tucker, C., Falkowski, M., Gessler, P., Morgan, P., & Hudak, A. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150.

CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DE ESTRÉS HÍDRICO EN EL CULTIVO DE PEPINO DULCE (*Solanum muricatum*)

SPECTRAL CHARACTERIZATION OF WATER STRESS IN THE CROP OF SWEET CUCUMBER (*Solanum muricatum*)

Karla Meza¹, Bryan Ruales¹, Javier Maiguashca², José Luis Rivadeneira²

¹ DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN, UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE, Av. Gral. Rumiñahui, s/n, Sangolquí-Ecuador, e-mail: kjmeza@espe.edu.ec; baruales1@espe.edu.ec.

² GESTIÓN DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO, INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR, Av. Seniergues E4-676 y Gral. Telmo Paz y Miño, Quito-Ecuador, e-mail: javier.maiguashca@igm.gob.com; jose.rivadeneira@geograficomilitar.gob.ecmail.com.

Recibido: 25 de septiembre de 2019

/Aceptado: 04 de mayo de 2020

RESUMEN

Las plantas poseen un grado de tolerancia hídrica, la carencia o exceso de este recurso produce que estas entren en un estado de estrés donde se ve afectada su morfología y fisiología. El presente estudio registró las variaciones que se efectúan en la planta a través de la energía reflejada a diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético (firmas espectrales) por medio de un espectroradiómetro FieldSpec 4Hi-Res, permitiendo de esta manera identificar en ciertas porciones del espectro electromagnético características esenciales como: clorofila, grado de humedad y vigorosidad. Mediante el cálculo de índices de vegetación tales como: NDVI, GNDVI, CCI, PRI y WI se obtuvo de manera indirecta particularidades diarias de los procesos biofísicos que tuvieron lugar en la planta de pepino dulce (*Solanum muricatum*), además por clasificación escalonada de coeficientes de correlación y pendientes se identificaron zonas del espectro con posibilidad de una correlación directa relevante indicando así las zonas (1431-1440) [nm] y (1466-1483) [nm] donde se ve reflejado el mayor impacto producido por el estrés hídrico en la planta ajustándose a un modelo polinómico de segundo grado con coeficientes de correlación de 0,9439 y 0,9229 respectivamente. La captura de información se realizó en 16 ensayos durante un periodo de 10 días, 8 ensayos sometidos a condiciones controladas de ausencia de riego contrastando con 8 ensayos de riego controlado para entender las diferentes respuestas ante ambas condiciones, con la finalidad de caracterizar el estrés hídrico y optimizar los recursos de riego en actividades de agricultura de precisión. Un análisis de divergencias con dichos ensayos demostró que las zonas del espectro que presentan un gran contraste son: (700-800) [nm], (1400-1500) [nm] y (1875-1900) [nm].

Palabras clave: Estrés hídrico, espectroradiómetro, firmas espectrales, índices espectrales.

ABSTRACT

The plants have a degree of water tolerance, the lack or excess of this resource causes them to enter a state of stress where their morphology and physiology are affected. The present study recorded the variations that are made in the plant through the energy reflected at different wavelengths of the electromagnetic spectrum (spectral signatures) by means of a FieldSpec 4Hi-Res radiometer, thus

allowing identifying at certain portions of the spectrum electromagnetic essential characteristics such as: chlorophyll, degree of humidity and vigor. By calculating vegetation indices such as: NDVI, GNDVI, CCI, PRI and WI, indirect daily characteristics of the biophysical processes that took place in the sweet cucumber plant (*Solanum muricatum*) were also obtained, in addition to a staggered classification of correlation coefficients and pending areas of the spectrum were identified with the possibility of a relevant direct correlation thus indicating the zones (1431-1440) [nm] and (1466-1483) [nm] where the greatest impact produced by water stress on the plant is reflected adjusting to a second degree polynomial model with correlation coefficients of 0.9439 and 0.9229 respectively. The capture of information was carried out in sixteen trials over a period of 10 days, 8 trials subjected to controlled conditions of absence of irrigation, contrasting with 8 controlled irrigation trials to understand the different responses to both conditions in order to characterize water stress and optimize irrigation resources in precision agriculture activities. An analysis of divergences with these tests showed that the areas of the spectrum that show a high contrast are: (700-800) [nm], (1400-1500) [nm] and (1875-1900) [nm].

Keywords: Water stress, spectroradiometer, spectral signatures, spectral indexes

INTRODUCCIÓN

Las plantas sufren diversos cambios cuando se alteran las proporciones de los recursos que necesitan para subsistir. El adecuado contenido de agua en las plantas es uno de los factores ambientales clave para su desarrollo, sin embargo, el déficit o exceso de este recurso puede ocasionar estrés hídrico (Mahajan & Tuteja, 2005).

Cuando existen variaciones en el contenido de humedad necesario, la planta sufre cambios en los procesos moleculares, bioquímicos y fisiológicos debido a que responden y se adaptan a la escasez hídrica para poder sobrevivir (Balboa, 2019). El cierre estomático es una de las primeras reacciones fisiológicas que tiene lugar en la planta ante el déficit hídrico lo cual provoca una disminución en la concentración de CO₂ dentro de la célula, lo que inhibe la fotosíntesis y produce daño al aparato fotosintético (Chaves, Flexas, & Pinheiro, 2009), también produce una rápida inhibición del crecimiento de sus raíces y en menor grado del tallo (Osakabe, Osakabe, & Shinozaki, 2014). Incluso puede interrumpir el desarrollo reproductivo, ocasionar senescencia foliar, marchitamiento, desecación y caída de hojas (Neuman, 2008).

Los cultivos de Pepino dulce (*Solanum muricatum*) son originarios de la región andina específicamente de los países Perú y Ecuador. La producción de este fruto en el país se localiza principalmente en las provincias de Pichincha, Imbabura, Tungurahua y Loja. Debido a la masiva expansión del fruto por el mundo, existen diversas variedades del mismo dependiendo su locación geográfica y condiciones climáticas propias de cada zona. En el Ecuador, los cultivos de esta plántula se caracterizan por poseer un sistema radicular ramificado y superficial que alcanza generalmente un máximo de 60 cm de profundidad, sus tallos son herbáceos y lignificados principalmente en su base, la mayoría de variedades cuenta con tallos de color verde y en menor cantidad algunas variedades alcanzan tonos morados (Calderón, Garzón, & Vargas, 2017).

Las hojas del pepino son simples o compuestas de tipo lanceoladas, con un total de 3 a 5 foliolos en el caso de las hojas compuestas llegando a alcanzar éstas un tamaño de entre 10 y 30 cm (Sánchez & Tapia, 1996), las plantas poseen además flores hermafroditas dispuestas en racimos, generalmente simples, que oscilan entre 5 y 20 flores de color blanco y vetas moradas. La fisiología de los frutos del pepino dulce varía dependiendo el cultivar y especie, generalmente alcanzan formas redondeadas, ovoides o alargadas.

El incremento de la demanda extranjera y producción del pepino dulce son las principales causas del desarrollo de tecnologías capaces de mejorar su productividad (Ruíz, 2013), evitar

problemas como el estrés de las plántulas y evitar pérdidas en cultivares, para lo cual, el manejo de óptimas prácticas agrícolas se ha vuelto una necesidad imperativa en los últimos años entre los agricultores de este producto. Por otro lado, se sabe que la aplicación inadecuada del agua de riego, ya sea en déficit o exceso ocasionan bajos rendimientos, mayores costos de producción y riesgos de acelerar los procesos de salinización en condiciones deficitarias de riego (Paccha, 2018).

En este contexto, la espectrometría permite estimar por medio de mediciones de reflectancia la porción de energía que es reflejada por un objeto (en este caso el foliolo de la planta) (He, Zhang, Gómez, & Wang, 2005). A diferencia de otros métodos este permite: minimizar tiempos de detección, evitar el uso de reactivos químicos y con la diferencia fundamental que no destruye las muestras (Cozzolino, 2003). Es por ello que es considerada una técnica prometedora para la evaluación del estado nutricional de especies vegetales (Mesa & Silva, 2015). A través del comportamiento espectral de una planta es posible explicar los cambios fisiológicos que ocurren en respuesta a la variación de un determinado factor, como por ejemplo, fijándonos en las firmas espectrales, específicamente en la porción del espectro del infrarrojo cercano (NIR) se puede observar si la planta posee o no estrés (Pinter, Hatfield, Schepers, Barnes, & Moran, 2003), es posible además estimar su potencial hídrico por medio del método de reflectancia espectral, sin embargo, esta técnica requiere de análisis estadístico para poder estimar las variables de interés (Vila & Hugalde, 2009).

Los datos de reflectancia obtenidos de las plantas incluso pueden ser utilizados para calcular índices de reflectancia espectral (Lobos & Hancock, 2015), estos relacionan valores de reflectancia de particulares longitudes de onda que varían ante diferentes estímulos, algunos de estos índices resultan de utilidad para determinar parámetros de vegetación como: actividad fotosintética, productividad, estrés hídrico y área foliar (Martínez, 2014), también pueden ser empleados para: estimar y evaluar el vigor de la vegetación, cuantificar y relacionar propiedades de las plantas (Berrío, Mosquera, & Alzate, 2015).

METODOLOGÍA

RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS ESPECTRALES

Para el presente estudio se obtuvieron plantas de pepino dulce mediante propagación vegetativa a partir de esquejes herbáceos de aproximadamente 20 cm de longitud extraídos de cultivares en estado fenológico post floración provenientes del cantón Patate, las estaquillas fueron enraizadas en contenedores de 40cmx40cm con sustrato de tipo franco-arenoso y no directamente en campo puesto que se realizaron los ensayos en laboratorio bajo condiciones constantes de fotoexposición y temperatura entre 15°C-18°C.

Previamente se seleccionaron y etiquetaron folíolos de cada planta, durante un período de 10 días se obtuvieron firmas espectrales promedio representativas para cada tratamiento las cuales fueron medidas mediante la utilización de un espectroradiómetro FieldSpec 4Hi-Res con el método “de contacto” y fueron promediadas empleando el software ViewSpecPro. Se registraron diariamente un total de ocho firmas espectrales por tratamiento que corresponden a cuatro ensayos con dos folíolos y abarcan alrededor del 80% del área foliar de las plantas de estudio.

Los resultados de folíolos sometidos a condiciones controladas de estrés por déficit hídrico se encuentran representados en el tratamiento uno (T1) mientras que los ensayos en los que se aplicaron dosis adecuadas de agua para la especie vegetativa analizada se representan en el tratamiento dos (T2). Se añadieron mediante riego localizado de alta frecuencia 0,0625 ml/cm² de agua cada 48 horas lo que equivale a 100 ml de agua por contenedor en cada planta,

la dosis y frecuencia de riego fueron calculados en base a la demanda hídrica óptima para el pepino dulce estimada por (Rodrigo Márquez & Cornelio Contreras , 2019).

Índices espectrales.

Se calcularon índices espectrales de vegetación a partir de los valores de reflectancia obtenidos diariamente durante el período de toma de datos (10 días). Las fórmulas empleadas para su cálculo se detallan en la Tabla 1.

Se seleccionaron índices que permitan evidenciar el comportamiento de las plantas de pepino dulce en base a dos criterios: El primero, que evidencien las condiciones de estrés hídrico y el segundo que correlacionen los valores a cambios fisiológicos que tiene lugar la planta tales como: el contenido de clorofila, cambios en la pigmentación de los folíolos, contenido hídrico y vigor.

Los índices de vegetación empleados para el presente estudio fueron: Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada Verde (GNDVI), Índice de Contenido de Clorofila (CCI), Índice Fotoquímico de Reflectancia Espectral (PRI) y el Índice Hídrico (WI).

Tabla 1. Índices espectrales de vegetación calculados

Índice	Abreviatura	Fórmula	Fuente
Índice de vegetación de la diferencia normalizada	NDVI	$\frac{(R_{750} - R_{750})}{(R_{750} + R_{750})}$	(Tucker, 1979)
Índice de vegetación de la diferencia normalizada verde	GNDVI	$\frac{(R_{750} - R_{550})}{(R_{750} + R_{550})}$	(Gitelson, Kaufman, & Merzlyak, 1996)
Índice de contenido de clorofila	CCI	$\frac{D_{720}}{D_{700}}$	(Sims, Luo, Hastings, Oechel, & Rahman, 2006)
Índice fotoquímico de reflectancia espectral	PRI	$\frac{(R_{531} - R_{570})}{(R_{531} + R_{570})}$	(Gamon, Pañuelas, & Field, 1992)
Índice hídrico	WI	$\frac{R_{900}}{R_{970}}$	(Peñuelas, Piñol, Ogaya, & Filella, 1997)

Análisis Estadístico.

A partir de los datos de reflectancia obtenidos diariamente se calculó el coeficiente de determinación (R^2) y la pendiente de cada valor del espectro electromagnético comprendido en el rango de (350-2500) [nm], posteriormente se aplicó un formato condicional de escalamiento por color. A través de métodos comparativos se identificaron intervalos del espectro con valores altos de R^2 y pendientes abruptas positivas y negativas.

Finalmente, se obtuvieron promedios diarios y se calcularon los coeficientes de correlación para los modelos de regresión lineal, exponencial y polinomial. Con la finalidad de obtener rangos en el espectro electromagnético en donde se presenten alteraciones notorias en

el comportamiento de las firmas espectrales y que a su vez estas tengan una estrecha relación con los cambios fisiológicos que se presenten en la planta durante el período de toma de datos.

RESULTADOS

Durante los primeros días los ensayos cohibidos de agua no presentaron un comportamiento significativo relevante para el estudio que muestre una correlación alta, por lo tanto, se eligió establecer correlaciones a partir del séptimo día donde ya existían cambios significativos dando como resultado correlaciones superiores a 0,9355 como se puede observar en la Tabla 2. Los índices con valores de correlación más altos fueron seleccionados para el presente estudio.

Tabla 2. Coeficientes de determinación R^2

ÍNDICE	(1 - 10) Día	(6 - 10) Día	(7 - 10) Día
NDVI	0,7108	0,9496	0,9621
GNDVI	0,6577	0,9041	0,9726
CCI	0,7250	0,9502	0,9664
PRI	0,7081	0,4800	0,9931
WI	0,6298	0,8961	0,9355

Como se muestra en la Figura 1 la mayoría de los índices espectrales en los ensayos con ausencia de riego controlado presentan un declive a partir del séptimo día, el más notorio es el CCI (Índice de Contenido de Clorofila) que nos indica la salud de la planta este presenta un decrecimiento de 2,179 (valor promedio del día uno al día siete) a 1,265 (valor del día diez). El NDVI (Índice de Vegetación Normalizada) es un indicador de actividad fotosintética, este posee un comportamiento similar al del GNDVI (Índice de Vegetación Normalizada Verde). El PRI (Índice Fotoquímico de Reflectancia Espectral) representa la eficiencia del uso de radiación relacionado también a la absorción de carbono, este índice a partir del sexto día presenta valores negativos. El índice espectral WI (Índice Hídrico) a diferencia de los otros índices apenas comienza a ser notorio desde el octavo día. Todos estos cambios que se puede observar en la tabla 3 y Figura 1.

Tabla 3. Índices espectrales diarios calculados para T1

ÍNDICE	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
NDVI	0,362	0,371	0,370	0,367	0,372	0,358	0,360	0,290	0,156	0,116
GNDVI	0,529	0,538	0,533	0,525	0,531	0,516	0,528	0,470	0,335	0,273
CCI	2,155	2,203	2,197	2,196	2,217	2,141	2,143	1,870	1,410	1,265
PRI	0,012	0,013	0,004	0,001	0,010	-0,002	-0,004	-0,021	-0,044	-0,059
WI	1,029	1,028	1,032	1,029	1,031	1,027	1,022	1,012	0,965	0,914

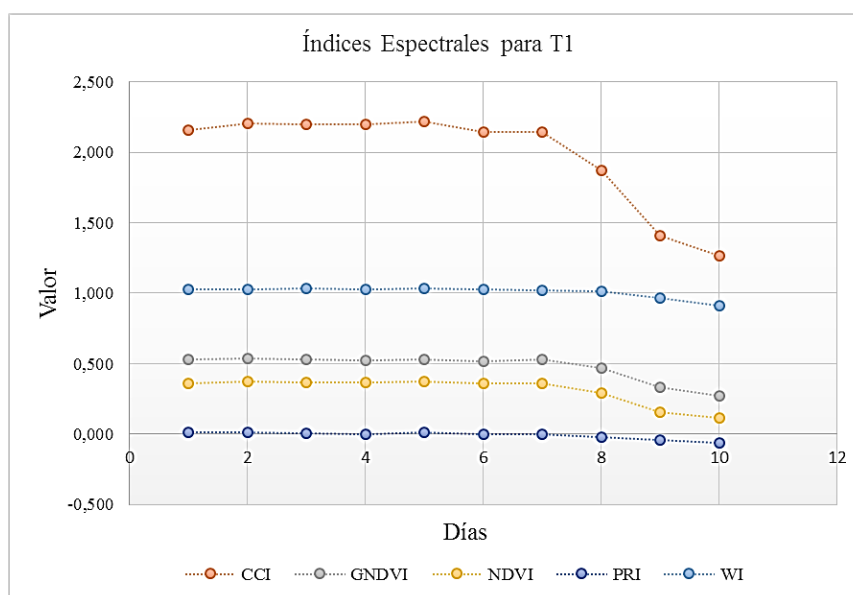


Figura 1. Modelo polinómico

Mediante clasificación escalonada de coeficientes de correlación y pendientes se identificaron las zonas del espectro con posibilidad de una correlación directa relevante, obteniendo como resultado los rangos: (1431-1440) [nm] y (1466-1483) [nm] en donde hay una alta correlación además en dichos intervalos existen las mayores pendientes tanto positivas como negativas, en estas porciones del espectro existe una tendencia a partir del sexto día y es posible evidenciar el impacto por estrés hídrico. El modelo que más se ajusta a esta tendencia es un modelo polinómico de segundo grado con un coeficiente de correlación de 0,9439 y 0,9229 respectivamente para cada intervalo como se muestra en la Figura 2. Los dos primeros días en los rangos expuestos en la tabla 4 impedían que exista una correlación debido a procesos naturales que tienen lugar en la planta así que para su mejor determinación fueron eliminados dando como resultado la tabla 5 donde existe una mejor correlación además de que existe un mejor ajuste en el modelo polinomial.

Tabla 4. Coeficientes de correlación por rango para T1 del día 1 al día 10

RANGO [nm]		Lineal	Exponencial	Polinomial
359	506	0,488	0,4881	0,8007
647	685	0,488	0,4609	0,7989
1431	1440	0,681	0,7296	0,9439
1466	1483	0,715	0,754	0,9229
1893	2003	0,485	0,4499	0,7896
2436	2500	0,480	0,4555	0,7717

Tabla 5. Coeficientes de correlación por rango para T1 del día 3 al día 10

RANGO [nm]		Lineal	Exponencial	Polinomial
359	506	0,3768	0,4721	0,8868
647	685	0,7821	0,8188	0,9555
1431	1440	0,7846	0,8345	0,9197
1466	1483	0,7994	0,8319	0,7824
1893	2003	0,7016	0,7437	0,7824
2436	2500	0,7298	0,7622	0,7954

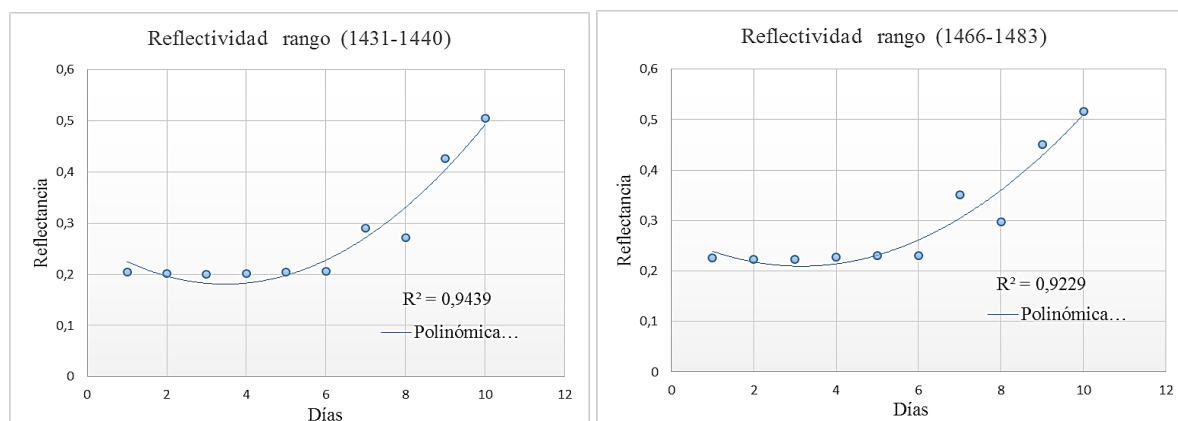


Figura 2. Modelo polinómico de segundo grado para los rangos (1431-1440) [nm] y (1466-1483) [nm]

En las firmas espectrales del tratamiento uno (T1) obtenidas diariamente durante el período de estudio se pudo evidenciar cambios significativos a partir del séptimo día.

Los intervalos comprendidos entre las longitudes de onda (500-700), (700-1150) [nm], (1400-1600) [nm] y (1850-2050) [nm] presentaron mayor divergencia en sus valores de reflectancia.

Los rangos (1400-1600) [nm] y (1850-2050) [nm] comprenden zonas del espectro electromagnético del infrarrojo cercano y representan el contenido de humedad de las plantas.

En la Figura 4 se aprecia la comparativa de T1 con respecto a T2, la disminución en los niveles de reflectancia para T1 en el rango (800-1100) [nm] se debe al déficit hídrico al que fueron expuestos los ensayos durante un período de 10 días y se relaciona directamente al cambio en la pigmentación de las hojas ocasionado por clorosis y necrosis de los folíolos. En el tratamiento dos (T2) se evidenció un comportamiento espectral típico de vegetación saludable, es decir que: la clorofila, contenido de agua y estructura interna de la hoja son normales.

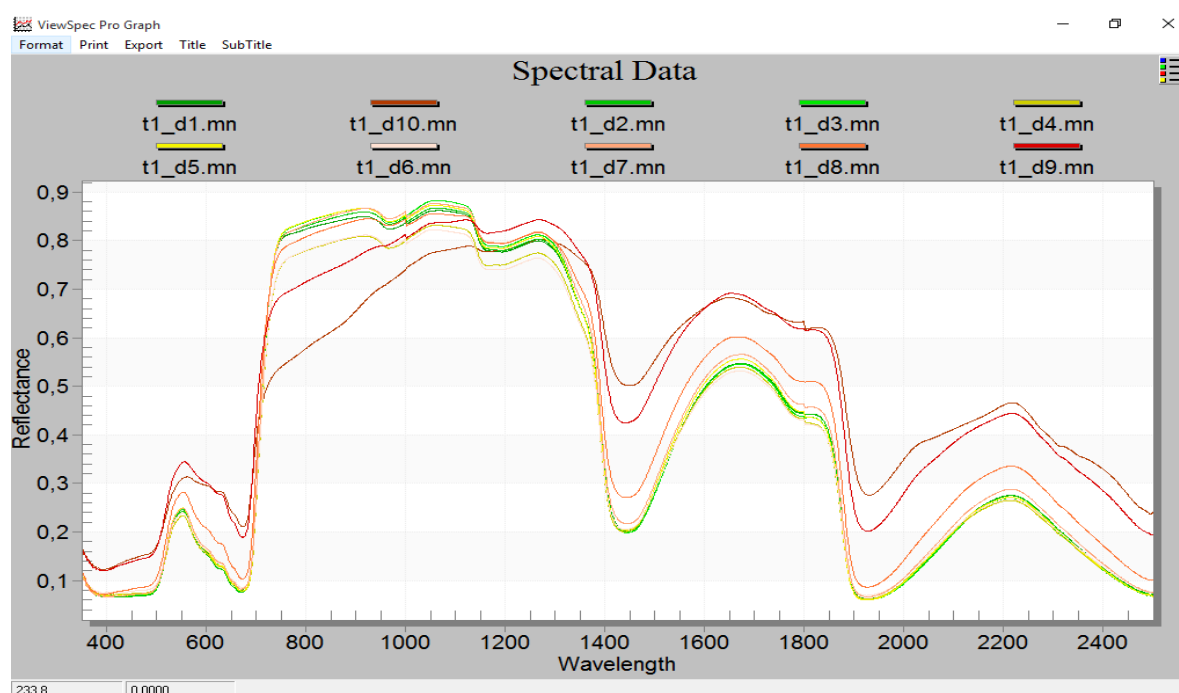


Figura 3. Firmas espectrales diarias de T1

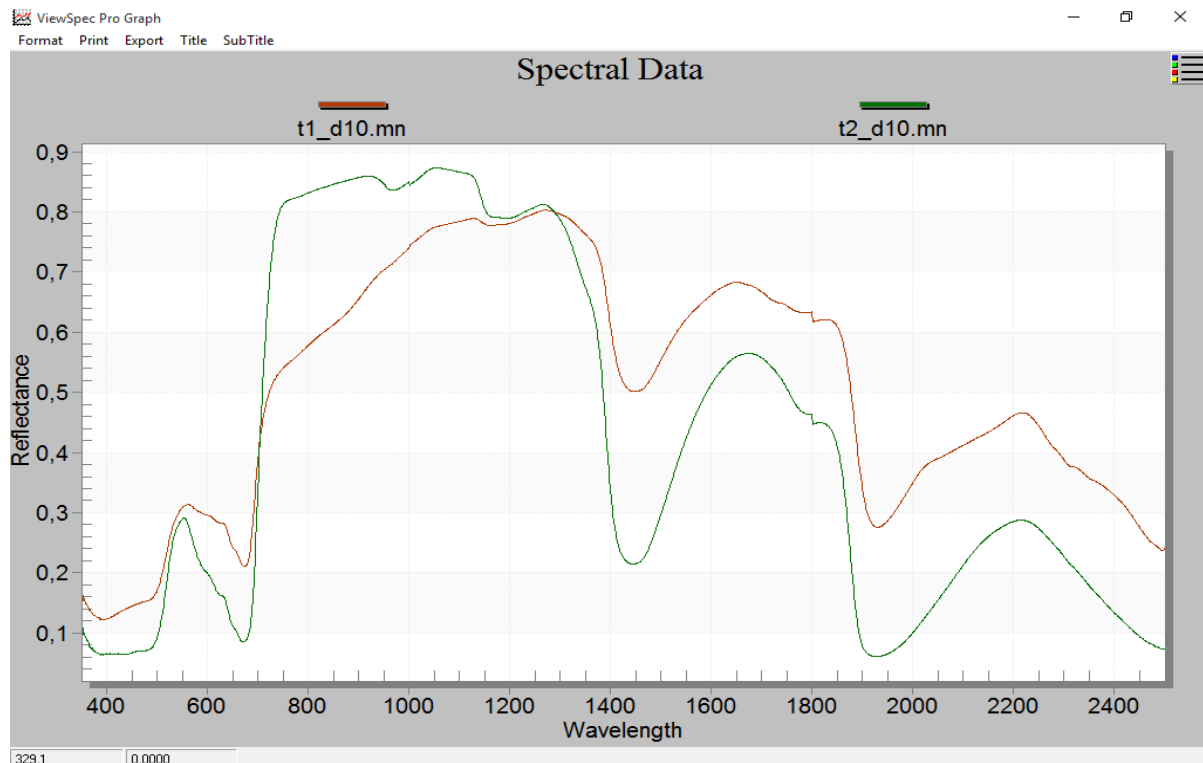


Figura 4. Comportamiento espectral del T2 vs T1 al día 10 de toma de datos

Mediante la desviación estándar se obtuvo el cálculo de divergencias entre las firmas espectrales promedio de ambos tratamientos, como indica la Figura 5 hay una gran divergencia en diferentes partes del espectro especialmente en los picos más altos.

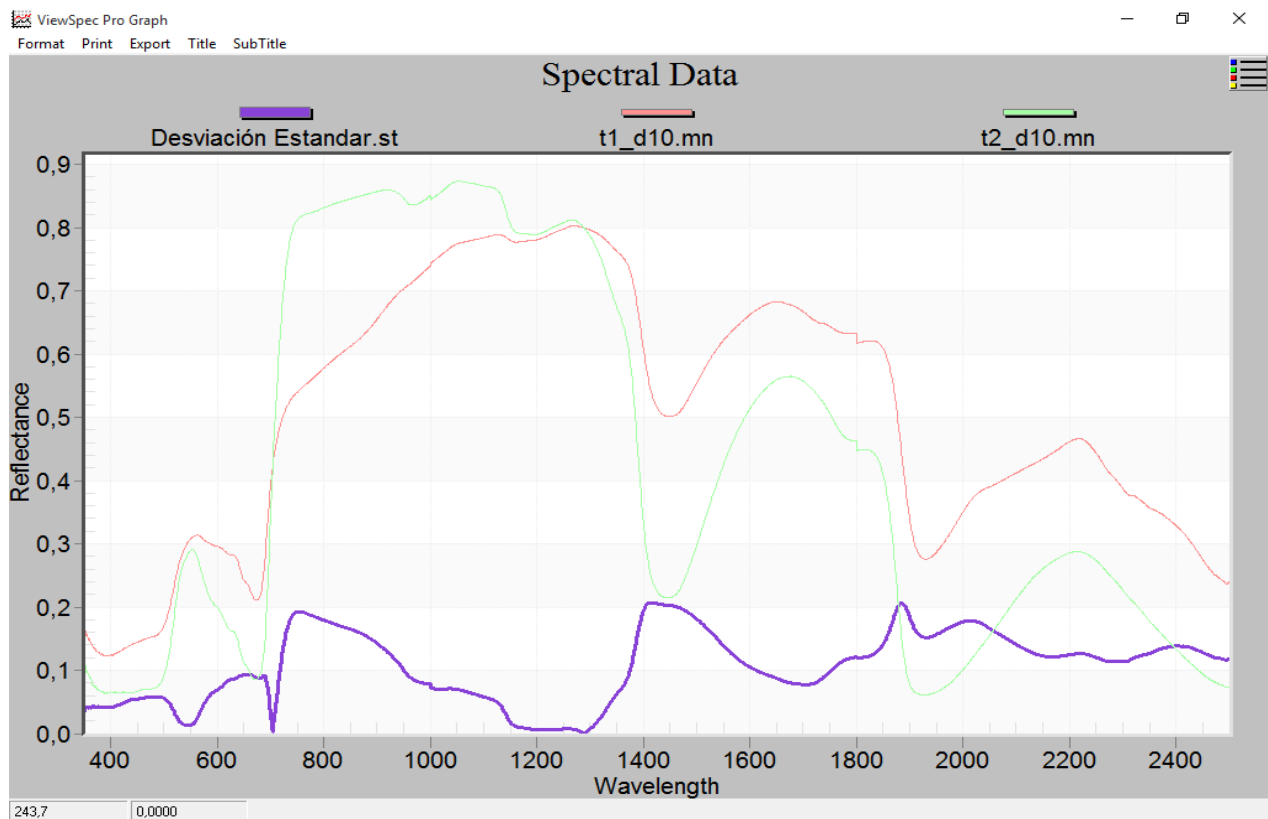


Figura 5. Desviación estándar del comportamiento espectral T1 y T2 al día 10 de toma de datos

CONCLUSIONES

En el intervalo del espectro visible comprendido entre 400 y 700 [nm], los valores de reflectancia e índices espectrales calculados se mantuvieron relativamente constantes durante los primeros 6 días tanto para el tratamiento sometido a condiciones de estrés por déficit hídrico (T1) como para el tratamiento testigo (T2) lo cual puede atribuirse a que durante este periodo de tiempo las plantas generan mecanismos de adaptación para la reserva de agua tales como el cierre estomático para la inhibición de la fotosíntesis e intercambio de nutrientes así como la reducción del área foliar para mermar procesos de evapotranspiración y pérdida excesiva de agua, sin embargo, a partir del séptimo día se evidencian cambios notables frente al estrés hídrico como: el aumento en los niveles de clorosis pasando de tonos verdes a tonos amarillos, necrosamiento predominante en el ápice y bordes externos de los folíolos, así como la sequedad de hojas que comenzaron a aminorar a partir del décimo día, dichos cambios se presentaron como un incremento representativo en los niveles de reflectividad hacia los límites superiores en la zona de la banda del rojo, de manera similar a estudios realizados por Pinter et al. , (2003).

A nivel espectral, los índices de vegetación a partir de valores de reflectancia indicaron una pérdida de clorofila importante de 41.94% referente al último día que se realizó la medición, de igual forma los niveles de actividad fotosintética y consumo de nitrógeno disminuyeron en un 68,26% y 48.27% respectivamente.

En el rango definido entre (800-1100) [nm] se representa el estado de la estructura interna de la hoja, siendo este un indicador de la vigorosidad y salud general de la planta, por lo tanto, de esta manera se atribuye que la vegetación saludable presenta mayor reflectancia en esta porción del espectro a diferencia de la vegetación seca o enferma. Finalmente en la porción del infrarrojo cercano, comprendido entre (800-2500) [nm], se determina que a mayor contenido de humedad menor reflectividad principalmente entre las longitudes de onda de (1400-1600) [nm] y (1850-2050) [nm].

En nuestro estudio se establece que: en el análisis de clasificación escalonada de coeficientes de correlación y pendientes en las zonas (1431-1440) [nm] y (1466-1483) [nm] del espectro existe el mayor impacto de estrés hídrico en la planta y mediante el análisis de divergencias por desviación estándar entre firmas espectrales se establecen los rangos: (700-800) [nm], (1400-1500) [nm] y (1875-1900) [nm].

El presente estudio plantea las bases para implementar y generar eficientes niveles de información para una óptima planificación y gestión de los recursos agrícolas, así, mediante el conocimiento de la respuesta espectral de las plantas de pepino dulce, es posible extrapolar su comportamiento ante condiciones de estrés por déficit hídrico y emplear dichos conocimientos al utilizar imágenes hiperespectrales de la superficie terrestre, con la finalidad de identificar y tratar de manera oportuna cultivos con la presencia de este tipo de estrés.

AGRADECIMIENTOS

A quienes conforman la Gestión de Investigación y Desarrollo perteneciente al Instituto Geográfico Militar, por facilitar los equipos e insumos empleados para el desarrollo del presente estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Balboa, K. (enero de 2019). Variación en las respuestas fisiológicas y moleculares de cultivares de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) sometidos a estrés por déficit hídrico. Obtenido de Universidad de Chile: <http://repositorio.conicyt.cl/.../Tesis%20Karen%20Balboa%20Silva.pdf>. Ingresado: 16 de agosto de 2019.
- Berrío, V., Mosquera, J., & Alzate, D. (18 de mayo de 2015). Uso de drones para el análisis de imágenes multiespectrales en. Obtenido de Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona. Ingresado: 14 de agosto de 2019.
- Calderón, D., Garzón, D., & Vargas, C. (2017). Aprovechamiento del fruto del pepino dulce por medio de tres productos en el área gastronómica. Obtenido de Facultad de Artes, Comunicación y Cultura: <https://pdfs.semanticscholar.org/8802/93446bf87f139f534cb5d76572c6e0952e31.pdf>. Ingresado: 15 de agosto de 2019.
- Chaves, M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/23133543_Photosynthesis_Under_Drought_and_Salt_Stress_Regulation_Mechanisms_From_Whole_Plant_to_Cell. Ingresado: 14 de agosto de 2019.
- Cozzolino, D. (2003). The potential of near-infrared reflectance spectroscopy to analyze soil chemical and physical characteristics. Obtenido de Journal of Agricultural Science: https://www.researchgate.net/publication/238145177_The_potential_of_near_infrared_reflectance_spectroscopy_as_a_tool_for_the_chemical_characterisation_of_agricultural_soils. Ingresado: 20 de agosto de 2019.
- Gamon, J., Pañuelas, J., & Field, C. (1992). *A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency*. doi:[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90059-S](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90059-S)
- Gitelson, A., Kaufman, Y., & Merzlyak, M. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. Obtenido de Remote Sensing of Environment: <https://www.researchgate.net/publication/222494609>. Ingresado: 16 de agosto de 2019.
- He, Y., Zhang, Y., Gómez, A., & Wang, J. (2005). Nondestructive Determination of Tomato Fruit Quality Characteristics Using Vis/NIR Spectroscopy Technique. Obtenido de International Journal of Information Technology: http://www.intjit.org/.../journal/volume/11/11/1111_11.pdf. Ingresado: 21 de agosto de 2019.
- Lobos, G., & Hancock, J. (2015). Breeding blueberries for a changing global environment: a review. Obtenido de Frontiers in Plant Science: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4588112/>. Ingresado: 14 de agosto de 2019.
- Mahajan, S., & Tuteja, N. (9 de noviembre de 2005). Cold, salinity and drought stresses: An overview. Obtenido de ELSEVIER Science Direct: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.500.63&rep=rep1&type=pdf>. Ingresado: 21 de agosto de 2019.
- Martínez, R. (2014). Análisis De Especies Vegetales Representativas Del Páramo De Chingaza Mediante Espectroradiometría De Campo. Obtenido de Fundación Universidad De Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Facultad De Ciencias Naturales E Ingeniería: <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/bitstream/handle/20.500.12010/1742/T052%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Ingresado: 21 de agosto de 2019.

- Mesa, C., & Silva, C. (2015). *Estudio de la relación entre la fertilización nitrogenada y la reflectancia espectral en el cultivo de papa (Solanum tuberosum L.)*. Obtenido de Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano: <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/.../T061.pdf>. Ingresado: 21 de agosto de 2019.
- Neuman, P. (5 de febrero de 2008). *Coping Mechanisms for Crop Plants in Drought-prone Environments*. Obtenido de Annals of Botany: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2710230/>. Ingresado: 19 de agosto de 2019.
- Osakabe, Y., Osakabe, K., & Shinozaki, K. (13 de marzo de 2014). *Response of plants to water stress*. Obtenido de Frontiers in Plant Science: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3952189/>. Ingresado: 19 de agosto de 2019.
- Paccha, M. (2018). *Determinar los requerimientos hídricos del pepino dulce (Solanum muricatum) mediante el lisímetro volumétrico en la parroquia malacatos sector "El Porvenir"*. Obtenido de Universidad Nacional de Loja: <https://dspace.unl.edu.ec/.../...SILVA.pdf>. Ingresado: 19 de agosto de 2019.
- Peñuelas, J., Piñol, J., Ogaya, R., & Filella, I. (1997). Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970). Obtenido de International Journal of Remote Sensing: <https://www.researchgate.net/publication/229084550>. Ingresado: 22 de agosto de 2019.
- Pinter, P., Hatfield, J., Schepers, J., Barnes, E., & Moran, S. (2003). Remote Sensing for Crop Management. Obtenido de <https://pdfs.semanticscholar.org/3842/c9bbe20b9f4f70ede447e5ef3b4cfb982c45.pdf>. Ingresado: 20 de agosto de 2019.
- Rodrigo Márquez, A., & Cornelio Contreras, A. (2019). *El cultivo del pepino dulce*. (A. Constanza Jana, Ed.) Obtenido de INIA INTIHUASI: biblioteca.inia.cl/.../boletines/NR41887.pdf
- Ruíz, K. (2013). Plan de exportación de pepino dulce desde San Antonio de Pichincha-Ecuador hacia Santa Cruz-Bolivia. Obtenido de UDLA: <http://dspace.udla.edu.ec/.../3736/1/UDLA-EC-TTEI-2013-13%28S%29.pdf> Ingresado: 20 de agosto de 2019.
- Sánchez, I., & Tapia, M. (1996). *Frutales Andinos, Pepino Dulce (Solanum muricatum)*. Obtenido de http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/prior/segalim/prodalim/prodveg/cdro m/contenido/libro10/cap03_4.htm
- Sims, D., Luo, H., Hastings, S., Oechel, W., & Rahman, A. (2006). *Parallel adjustments in vegetation greenness and ecosystem CO2 exchange in response to drought in a Southern California chaparral ecosystem*. ScienceDirect, 289-303.
- Tucker, C. (May de 1979). *Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation*. doi:[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Vila, H., & Hugalde, I. (octubre de 2009). *Estimación de potencial hídrico en vid por medio de medidas termográficas y espectrales*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/259851146_Estimacion_de_potencial_hidrico_en_vid_por_medio_de_medidas_termograficas_y_espectrales

ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL PASTO MEDIANTE NDVI CON IMÁGENES MULTIESPECTRALES DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAV)

GRASS YIELD ESTIMATION THROUGH NDVI ANALYSIS WITH MULTISPECTRAL IMAGES OF UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAV)

IZAR SINDE^{1,2}; DIANA YÁNEZ¹; JOSÉ GREFA¹; MARCOS ARZA²; MARILUZ GIL²

¹ Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente, Departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Avenida General Rumiñahui s/n Sangolquí, Ecuador, iisinde@espe.edu.ec; smcisneros2@espe.edu.ec; eegarcia3@espe.edu.ec; kjmontoya@espe.edu.ec.

² Universidad de Santiago de Compostela, Departamento de Ingeniería Agroforestal. Rúa Benigno Ledo, Campus Universitario 27002 Lugo, España, izar.sinde@rai.usc.es; m.arza@usc.es; ml.gil@usc.es

Recibido: 03 de Abril de 2020

/ Aceptado: 29 de Mayo de 2020

RESUMEN

La aplicación de nuevas tecnologías permite el manejo de forma puntual de un cultivo para la toma de decisiones en el proceso de producción. En el Ecuador la alimentación de la ganadería se basa en pastos. En la región de la sierra el tipo de pasto predominante es el kikuyo, rey grass anual y el rey grass perenne. Este estudio tuvo como objetivo determinar la relación entre índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), y las variables físicas del suelo en tres especies forrajeras (kikuyo, rye grass anual, rye grass perenne) con y sin fertilización, mediante técnicas basadas en sensores remotos no tripulados con sensores de bajo costo. Para lograr este objetivo se llevó a cabo la caracterización y el análisis de los nutrientes del suelo para proceder a la fertilización y siembra. Se ejecutaron vuelos multitemporales con cámaras RGB e infrarrojo con el fin de generar ortomosaicos, se calcularon los índices de evaluación multicriterio (EMC) y el índice de vegetación NDVI. La EMC integró variables de orientación, luminosidad y pendiente y el NDVI se calculó con álgebra de bandas. Finalmente se realizó una correlación entre NDVI y EMC obteniendo un valor de 0,32 de r^2 ajustándose a una función lineal, en cambio la correlación entre vigorosidad y porcentaje de crecimiento fue de 0.964 de r^2 . En general se puede afirmar que la vigorosidad del cultivo no se vio afectada de manera sustancial por las características del suelo objeto de estudio, en especial al cultivo rye grass anual, lo que hace entrever la facilidad de este cultivo para adaptarse a condiciones no adecuadas para su desarrollo.

Palabras clave: Monitoreo de pastos, Índice de vegetación, UAV, NDVI.

ABSTRACT

Modern technologies allows the timely management of a crop for decision-making in the production process. In Ecuador, livestock feed is based on pastures. In the mountains of the Ecuadorian Andes, the predominant type of grass is kikuyograss, annual ryegrass and perennial ryegrass. This study aimed to determine the relationship between Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and the physical variables of the soil in three forage species (kikuyograss, annual ryegrass and perennial ryegrass) with and without fertilization, using unmanned aerial vehicles with inexpensive sensors. To achieve this objective, characterization and analysis of soil nutrients were carried out to proceed with fertilization and planting. Multitemporal flights were performed with RGB and near infrared cameras in order to generate orthomosaics, the multicriteria evaluation indices (EMC) and the NDVI vegetation index were calculated. The EMC consider orientation, luminosity and slope as morphological variables

and the NDVI was calculated with map algebra. Finally, a correlation was made between NDVI and EMC, obtaining a value of 0.32 of r^2 adjusting to a linear function, on the other hand the correlation between vigor and growth percentage was 0.964 of r^2 . In general, it can be stated that the vigor of the crop was not substantially affected by the characteristics of the soil under study, especially the annual ryegrass crop, which suggests the ease of this crop to adapt to conditions not suitable for its development.

Keywords: Crop monitoring, Vegetation index, UAV, NDVI

INTRODUCCIÓN

El sector agrícola en Ecuador se enfrenta a retos climáticos, biológicos y ambientales que no permiten un adecuado desarrollo de los sistemas productivos y reducen la capacidad de producción neta. En el país, el cultivo de pasto sirve como alimento base para la actividad ganadera y es un factor importante en su productividad y rentabilidad. La cuantificación de los pastizales respecto al excedente y déficit de la materia verde tiene como finalidad implementar tecnologías que permitan un adecuado manejo agronómico.

La región interandina de la República del Ecuador se caracteriza por poseer especies de pasto predominantes como el kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), rye grass anual (*Lolium multiflorum*) y rye grass perenne (*Lolium perenne*). La especie rye grass presenta un rápido crecimiento, fácil recuperación y adaptabilidad a cualquier tipo de suelo (Posada Ochoa, Cerón et al. 2013, Grijalva, Espinosa et al., 1995). El kikuyo, por su parte, posee una menor adaptación a los suelos pobres, en los que requiere generalmente una dosis de fertilización (Mejía-Taborda, Ochoa-Ochoa et al., 2014). Los avances que se han producido en las técnicas de fotogrametría aérea y sensores remotos podrían contribuir a mejorar los estudios de este tipo de pastos y dar solución a muchos de los problemas que plantea su producción (García, 2002).

La teledetección es una técnica eficiente para obtener información sobre objetos, áreas o fenómenos como: vegetación, zonas urbanas y rurales, tierra agrícola y recursos hídricos sin entrar en contacto físico con éstos (Karaburun, 2010). En la actualidad, los sensores remotos, permiten obtener altas resoluciones espaciales y una capacidad de respuesta casi inmediata al ser utilizados sobre plataformas aéreas no tripuladas (UAVs o vehículos aéreos no tripulados). Estas aeronaves no tripuladas pueden volar de manera autónoma y ser equipados de una cámara u otro tipo de sensor remoto dependiendo del fin perseguido (Mahajan, Raj 2016). El uso de UAVs en el ámbito civil ha experimentado un reciente boom debido al desarrollo de sistemas que le confieren un alto grado de automatización y facilidad de uso y que permiten además una drástica reducción de costes en relación a los vuelos tripulados tradicionales (Honkavaara, Saari et al., 2013)

Los UAV's poseen un amplio rango de aplicaciones en el ámbito agrícola: desde la agricultura de precisión (Bareth, Jung et al., 2015), monitoreo del estado fenológico de la vegetación (Aasen, Burkart et al., 2015), monitoreo de masas arbóreas (Näsi, Honkavaara et al., 2015), monitoreo del suelo (Kim, Song et al., 2014) hasta la teledetección ambiental (Pajares 2015). Gracias al avance tecnológico, los drones pueden transportar cámaras multispectrales con las que se pueden registrar, además de los canales del espectro visible (380 nm - 780 nm), otros canales de gran utilidad en el estudio de las cubiertas vegetales, como es el infrarrojo cercano (NIR). Esta banda NIR (780 nm – 900 nm aprox.) resulta de gran utilidad en el mapeo de terrenos agrícolas y el monitoreo del estado de la vegetación, estrés hídrico, rendimiento óptimo de cultivos, detección temprana de enfermedades y plagas, entre otros usos (Ali, Jassem 2014, De la Casa, Ovando, 2007).

Mediante la tecnología multispectral se pueden desarrollar los denominados índices que proporcionan una estimación acerca de las condiciones específicas de distintas cubiertas, entre ellas, la vegetación (Paruelo, 2008). Los índices no son más que transformaciones o combinaciones matemáticas (generalmente cocientes) de las bandas espectrales capturadas por un determinado sensor cuyo objeto es

detectar algún aspecto o variación específica en la superficie. Uno de los más conocidos y utilizados, tanto en el ámbito agrícola como en campos afines, es el NDVI o Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada [$NDVI = (RNIR - RR) / (RNIR + RR)$], (Rouse Jr, Haas et al. 1974). En agronomía este índice, muy asociado al contenido en clorofila de la vegetación, se ha utilizado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de un diverso rango de cultivos: como trigo (Hassan, Yang et al. 2019), arroz (Stroppiana, Migliazzi et al., 2015), cebada (Park, Na et al., 2018) o la monitorización del crecimiento de pastos (Lussem, Hollberg et al., 2017).

El objetivo de esta investigación es analizar el rendimiento de tres especies de pastos (*Pennisetum clandestinum*, *Lolium multiflorum* y *Lolium perenne*) bajo diferentes tratamientos y en parcelas de cultivo experimental, mediante estimación de valores de NDVI. Para ello se propone la utilización de las plataformas UAVs y los sensores remotos multiespectrales de bajo coste.

MATERIALES

ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio está ubicada en la hacienda El Prado IASA I, Sangolquí, en la provincia de Pichincha (Ecuador) [$0^{\circ}22'56''S$, $78^{\circ}25'00''O$, elev. 2.705 m] como se observa en la figura 1 y cuenta con 8.335 m². Para el análisis del cultivo el área se dividió en parcelas de 80 metros cuadrados aproximadamente con un metro de distanciamiento entre ellas, obteniendo un total de 77 parcelas.

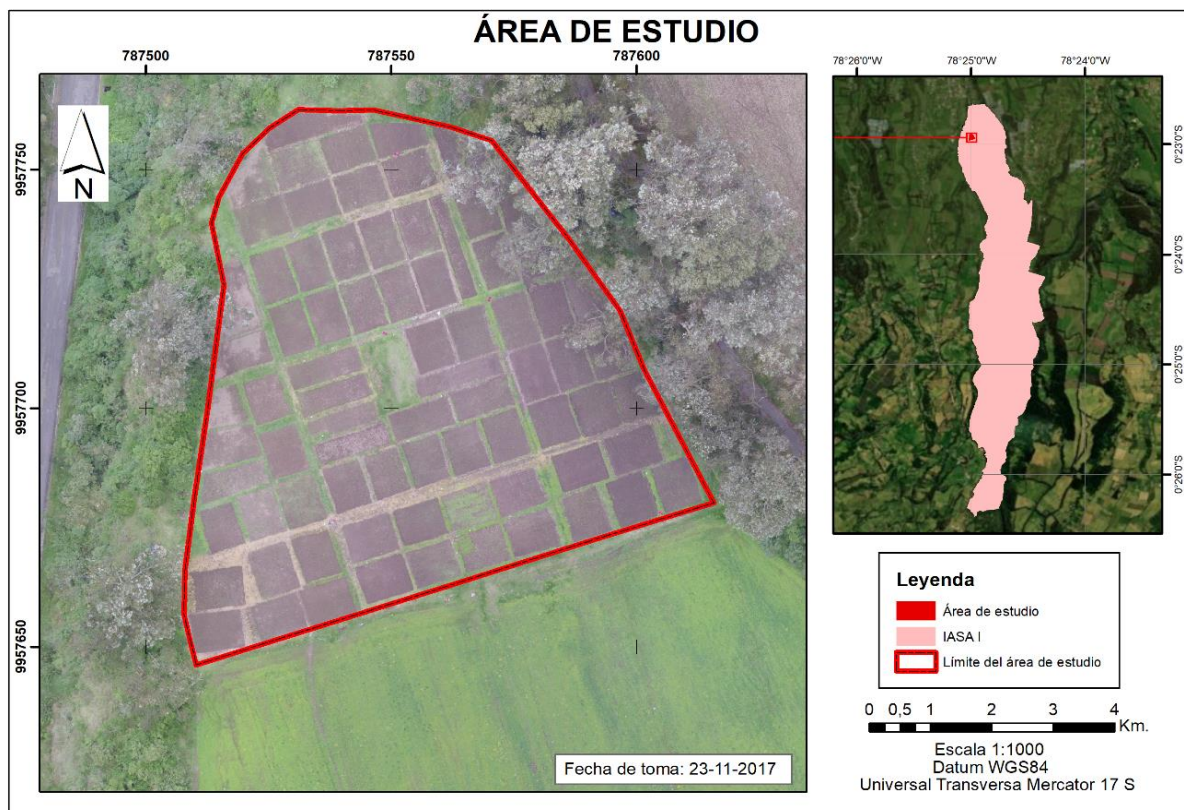


Figura 1: Zona de estudio.

CARACTERÍSTICAS DEL UAV, EL SENSOR Y EL RECEPTOR GNSS

El equipo utilizado para la captura de información fue un dron DJI Phantom 4, con un coste relativamente bajo y cuyas características son: 1,3 kg con una velocidad de hasta 72 km/h y una altura máxima de vuelo de 6.000 msnm. en condiciones ideales. La cámara original [RGB] del dron fue

desmontada para incorporar una lente de 3,97mm f/2,8 82d HFOV 16MP (ver figura 2). Este cambio permite capturar la longitud de onda infrarroja en el canal azul [B] y la correspondiente al rojo en el canal rojo [R], permitiendo con ello el registro de las reflectancias necesarias para el cálculo del NDVI.



Figura 2: a) Lente NIR GP39728Green b) Tarjeta de calibración c) Drone DJI Phantom 4.

Para la correcta calibración radiométrica de la cámara se utiliza una tarjeta de calibración que permite ajustar de forma automática el balance radiométrico de los píxeles de la imagen. Esta calibración se realiza sistemáticamente antes de cada vuelo tomando fotografías de todo el paquete abierto con la placa de blancos hacia arriba.

Para la toma de puntos de control se utilizó un equipo Trimble R8 de doble frecuencia y los datos de la estación de monitoreo continuo EPEC perteneciente a la REGME.

SOFTWARE

Para el procesado fotogramétrico digital de las imágenes se utilizó el software Agisoft PhotoScan (San Petersburgo, Rusia) que permite tanto la generación de modelos en 3D como la obtención de imágenes ortorrectificadas y ortomosaicos a partir de una colección de imágenes desorientadas. El posterior cómputo de mapas de NDVI se realizó con el software QGIS.

METODOLOGÍA

EVALUACIÓN MULTICRITERIO

A partir del modelo digital del terreno generado en el levantamiento fotogramétrico, se calcularon tres variables físicas, la pendiente, la orientación y la luminosidad. Con los datos obtenidos en campo de estas variables físicas, se generó un modelo que determina el índice de crecimiento del pasto de acuerdo a estas variables en cada parcela. Cada ponderación desarrollada mediante la matriz de Saaty modificó el peso de los factores. De la combinación de las ponderaciones en cada parcela se pudo obtener un índice EMC, que indica la pertinencia geométrica de la finca para el desarrollo de un cultivo.

CARACTERIZACIÓN NUTRICIONAL DEL TERRENO

Como paso previo al estudio de los cultivos por teledetección se realizó un análisis a nivel de nutrientes del suelo (P, Fe, Ca) y para ello fue necesario realizar un muestreo de tipo aleatorio sistemático en forma de zigzag según la topografía del terreno (Bianchini, Natali et al., 2012). La superficie total se dividió en base a características y superficies similares, obteniendo un total de 11 zonas (Ver Figura 3), en las que se realiza un muestreo estratificado de 10 sub-muestras por cada una. Las muestras de cada zona fueron homogeneizadas para obtener 1 kg de muestra compuesta. Estas muestras fueron enviadas al laboratorio del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) obteniendo los resultados que se muestran en la figura 4.

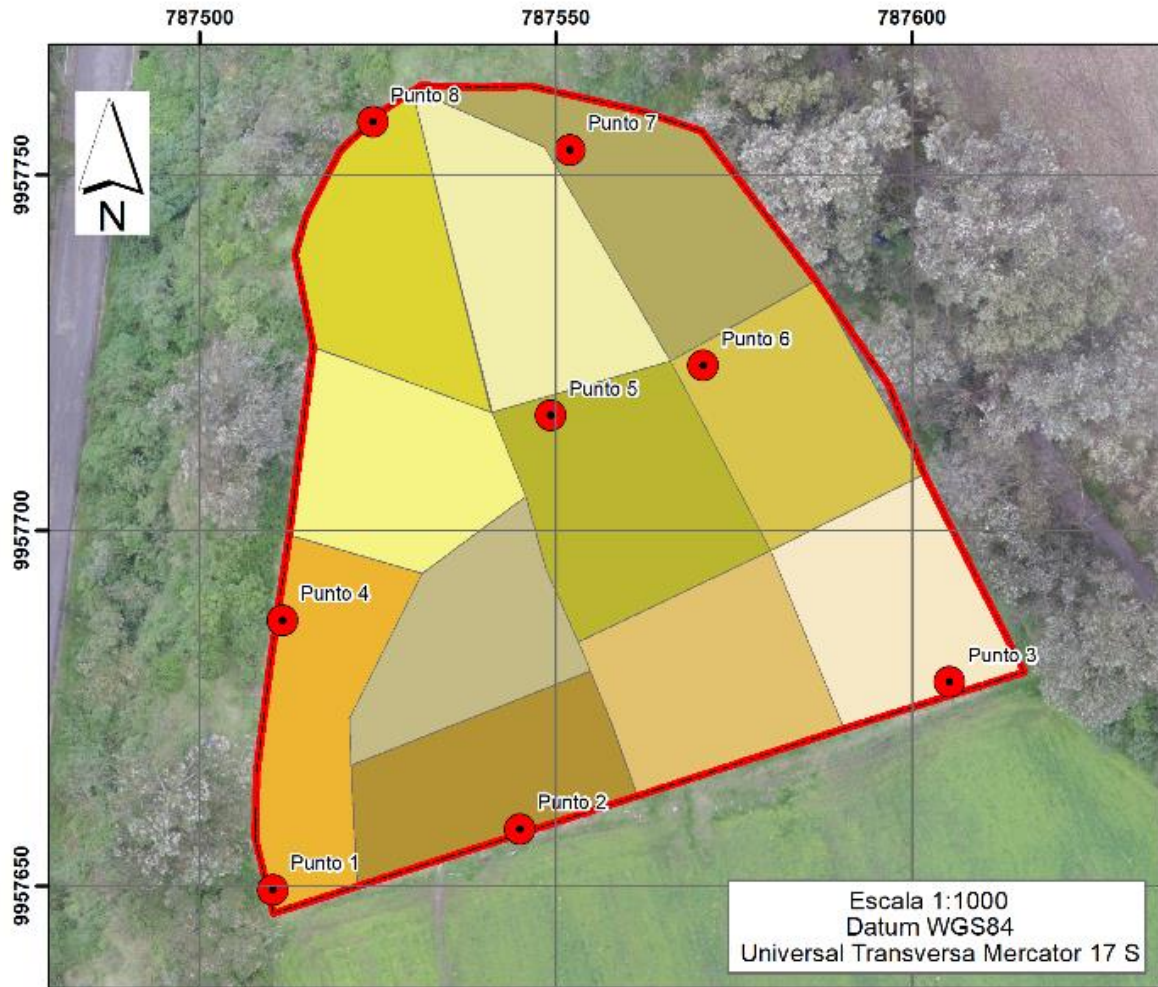


Figura 3 Zonas homogéneas y puntos de control.

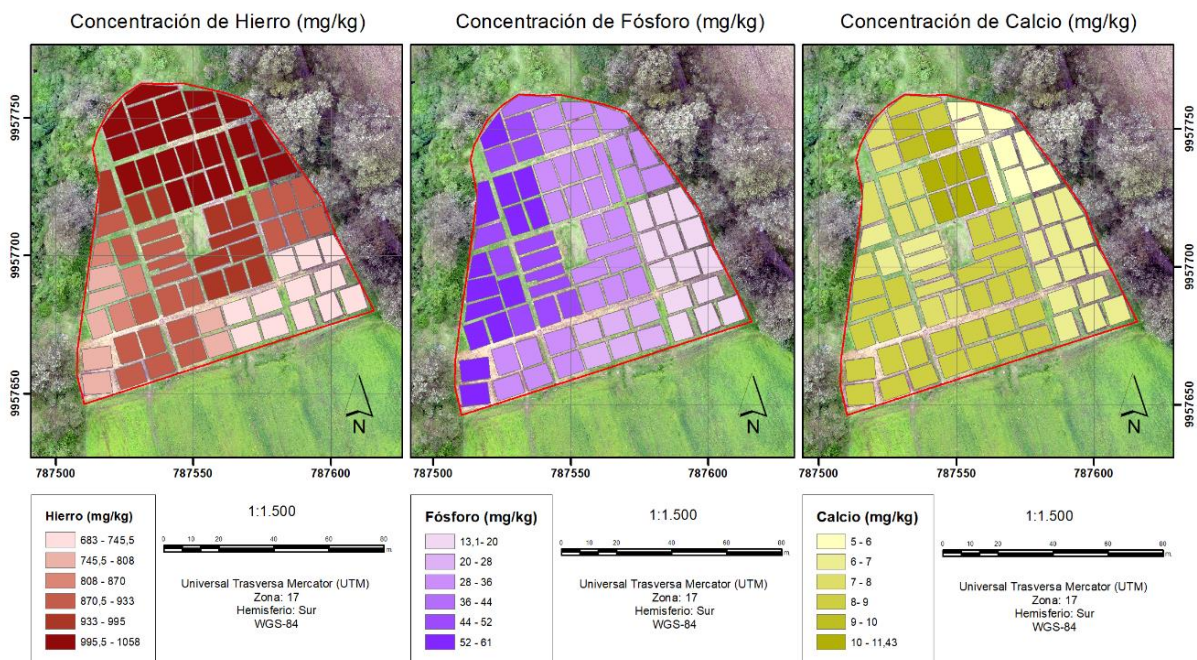


Figura 4: Muestreo inicial del suelo en las parcelas de cultivo experimental

TRATAMIENTOS

El área de estudio se divide en parcelas de aproximadamente 8x10 m (80 m²). En dichas parcelas se realiza una siembra mediante la técnica de siembra “al voleo” con fumigación a los primeros brotes para evitar las malezas. Los tratamientos fueron sometidos a un solo corte cuyo crecimiento máximo es de 60 días para las tres especies (Hernández, 1993; Villalobos, Sánchez, 2010). El efecto de la pendiente del terreno (alta %, media % y baja %) fue considerado para la distribución de los tratamientos, así como el análisis previo del suelo. En la figura 5 se indica la distribución de cultivos y las fertilizaciones (0: sin fertilización o 1: con fertilización compuesta 10-30-10) asignadas a cada una de las 77 parcelas de estudio.

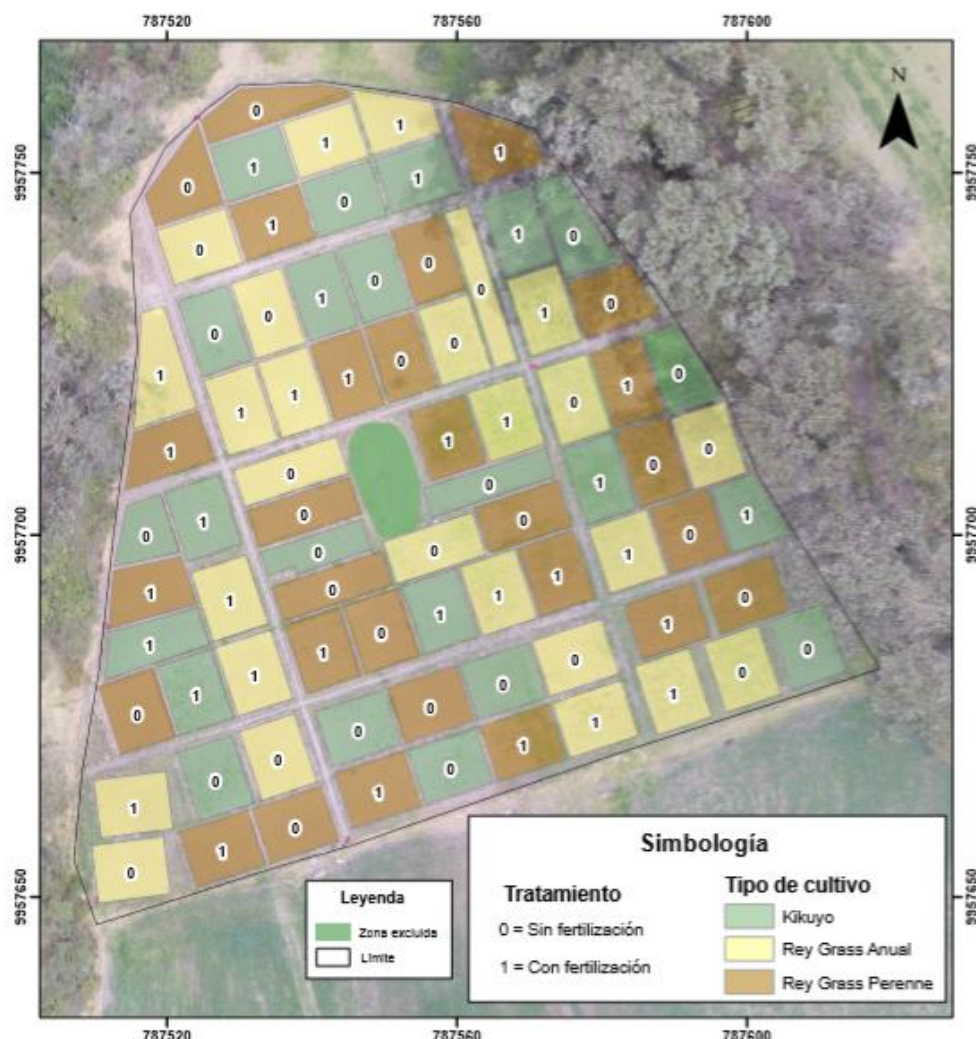


Figura 5: Parcelas de cultivo experimental por tipo de cultivo y tratamiento de fertilización.

TOMA DE DATOS

Para el análisis del índice NDVI fue necesaria la ejecución de dos vuelos en las diferentes etapas de crecimiento del pasto. Estas imágenes se obtuvieron a partir de la cámara original del dron DJI Phantom 4 modificada con la lente de 3.97 mm [R + NIR]. En la tabla 1 se observan las características de los vuelos de las dos campañas realizadas. En ambos casos las imágenes fueron radiométricamente calibradas empleando la tarjeta de calibración específica para esta cámara.

Tabla 1: Características de los vuelos realizados.

Parámetros	Primer vuelo	Segundo Vuelo
Altura de vuelo (m)	70	70
Solape longitudinal	80%	80%
Solape transversal	70%	70%
GSD (cm/pixel)	3,06	3,05
Tiempo de vuelo (min)	5	7
N° de imágenes	74	98
Fecha	21/ Dic/2017	11/ Ene/2018
Observación	Primeros brotes	En el primer corte

PROCESAMIENTO DE DATOS

Las imágenes se procesaron en el software Agisoft PhotoScan. Primero se realizó la orientación externa de las cámaras para generar la malla de puntos homólogos. Para ajustar la posición de cada fotografía se realizó el ingreso y marcado de los puntos de control (Ver Figura 3), con ello se logra obtener una nube de puntos densa y generar el modelo digital de elevaciones (MDE), así como el ortomosaico.

El ortomosaico generado se cargó en el programa QGIS, con el complemento Mappir previamente instalado. Primero se selecciona el código QR, que permite leer los valores de reflectancia de la vegetación, seguido del directorio en donde se encuentra el insumo a calibrar. Finalmente se obtiene el ortomosaico calibrado para calcular el NDVI.

CÁLCULO DEL NDVI

El crecimiento del pasto no se generó de manera uniforme en todas las parcelas como se indica en la tabla 2, lo que produce una distorsión en los datos debido a la presencia de zonas de suelo desnudo. Todo esto se genera principalmente porque el índice de vegetación en suelo desnudo es positivo, aunque con valores bajos, puede confundirse con vegetación arbustiva baja y alterar el resultado. Es así que se aplicó una clasificación no supervisada a cada unidad experimental para no tomar en cuenta los valores de suelo desnudo que puedan influenciar en el cálculo del NDVI. Mediante el software Erdas, se logró clasificar la vegetación en crecimiento de la imagen original (con sus diferentes tipos de vigorosidad) y suelo desnudo.

En cuanto al cálculo del porcentaje de crecimiento, se desarrolló a partir de la clasificación supervisada.

Tabla 2: Parcelas experimentales

TRATAMIENTOS	N° PARCELAS SEMBRADAS	N° PARCELAS COSECHADAS	% PARCELAS CORRECTAMENTE DESARROLLADAS
Kikuyo sin fertilización	6	5	83,33
Kikuyo con fertilización	8	2	25,00
Rye Grass Anual sin fertilización	11	11	100,00
Rye Grass Anual con fertilización	13	13	100,00
Rye Grass Perenne sin fertilización	14	12	85,71
Rye Grass Perenne con fertilización	12	11	91,66
TOTAL	64	54	84,37

El modelo se exportó en formato .tif para su análisis y con la intersección del archivo vector anteriormente obtenido, finalmente se generaron los índices de vegetación de cada unidad experimental. Esta metodología se aplicó en todos los ortomosaicos.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

CORRELACIÓN ENTRE EMC Y NDVI.

Para establecer la influencia de las características morfológicas del terreno en el crecimiento y desarrollo del cultivo se calculó la correlación entre el valor del índice EMC con el índice NDVI obtenido en Enero (tabla 3).

Tabla 3: Correlación entre EMC y NDV

TRATAMIENTOS			
	EMC	NDVI Enero	NDVI-EMC (r^2)
Kikuyo sin fertilización	0,589	0,453	0,33
Kikuyo con fertilización	0,443	0,482	-----
Rye Grass Anual sin fertilización	0,619	0,553	0,14
Rye Grass Anual con fertilización	0,671	0,559	0,05
Rye Grass Perenne sin fertilización	0,685	0,512	0,54
Rye Grass Perenne con fertilización	0,629	0,487	0,56
PROMEDIO	0,639	0,513	0,324

CORRELACIÓN ENTRE PARÁMETROS DEL SUELO Y NDVI.

Para deducir si las concentraciones de fósforo, hierro y calcio tienen influencia directa en el desarrollo del pasto, se estableció un índice de correlación entre cada uno de los compuestos y la respuesta del índice NDVI, obteniendo los resultados que se pueden observar en la tabla 4.

Tabla 4: Correlación entre concentración de nutrientes y NDVI.

TRATAMIENTOS		
	NDVI-Concentración mg/kg (r^2)	
Fósforo	-0.37	
Calcio	-0.43	
Hierro	-0.03	

RESULTADOS DE NDVI Y PORCENTAJE DE CRECIMIENTO POR TRATAMIENTO.

El promedio de los índices de NDVI a partir de orto mosaicos calibrados a mitad y final del periodo vegetativo de pastos se muestra en la tabla 5. Estos valores indican el tratamiento utilizado, el área de vegetación y su respectivo porcentaje. El valor de crecimiento máximo fue del 90 % correspondiente al rye grass anual con fertilización. Por otra parte, el kikuyo mostró los valores más bajos de NDVI y porcentaje de crecimiento (Ver tabla 5).

El porcentaje de crecimiento se calculó en base a una clasificación supervisada realizada al cultivo, de forma que se obtienen el número de píxeles de pasto y el número de píxeles de suelo donde no se desarrolló. De la división del numero de píxeles totales de la parcela para el número de píxeles de pasto se obtiene este indicador.

Tabla 5: NDVI y área de crecimiento.

Tratamiento	Diciembre			Enero		
	NDVI Promedio	Área con vegetación Promedio (m ²)	% de Crecimiento	NDVI Promedio	Área con vegetación Promedio (m ²)	% de Crecimiento
Kikuyo sin fertilización	0,377	14,88	25,81	0,453	17,75	29,94
Kikuyo con fertilización	0,363	10,65	14,43	0,482	19,09	25,61
Rye Grass Anual sin fertilización	0,368	50,66	69,21	0,553	63,38	85,85
Rye Grass Anual con fertilización	0,371	54,96	74,71	0,563	66,05	90,34
Rye Grass Perenne sin fertilización	0,371	26,80	37,26	0,512	42,57	59,31
Rye Grass Perenne con fertilización	0,362	24,83	33,18	0,487	33,90	45,36

CORRELACIÓN ENTRE COBERTURA VEGETAL E ÍNDICE DE VEGETACIÓN NDVI

Los valores de NDVI y el porcentaje de área con vegetación están muy correlacionados ($r^2=0,964$) como se observa en la Figura 6. El modelo lineal explica la relación directa entre el área de vegetación efectiva y el NDVI, es decir si el NDVI aumenta, el porcentaje de crecimiento también lo hará. Este índice es exclusivo de los espectros de la vegetación discriminando totalmente los espectros mostrados por el suelo (Gilabert, González-Piqueras et al., 1997)

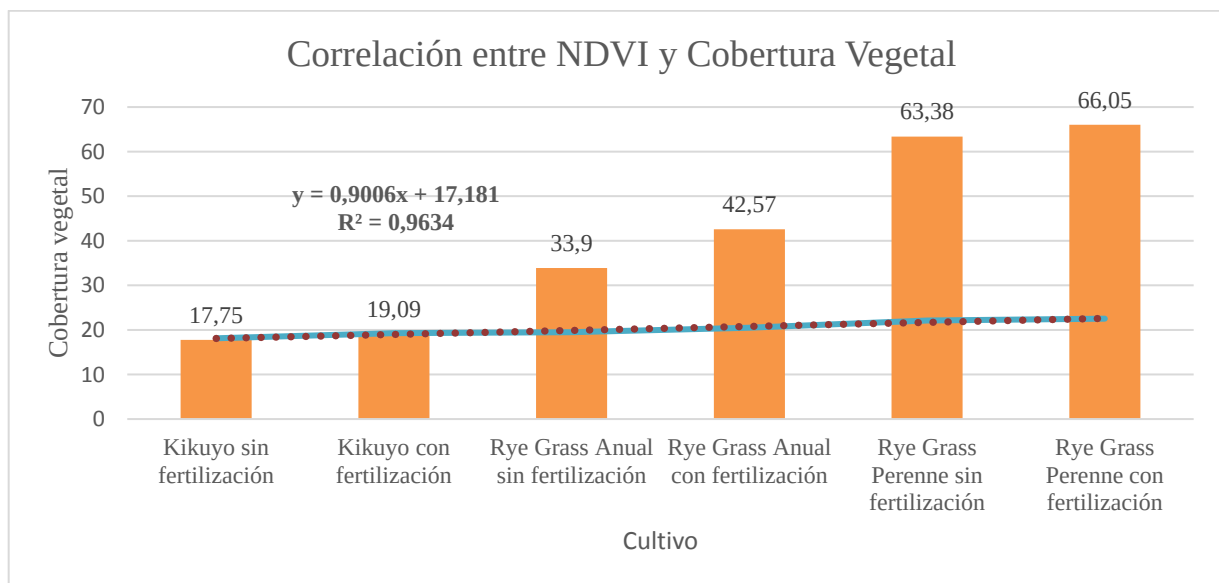


Figura 6: Correlación del NDVI y la Cobertura Vegetal.

MAPAS DE NDVI

A continuación, se presentan los mapas de NDVI (Figura 7 y 8), estos valores varían de (0,34 a 0,59) y muestran a la zona de estudio en escala de colores. Las tonalidades rojas y amarillas representan escasa vigorosidad vegetal, mientras que los colores verdes simbolizan áreas con mayor vigorosidad vegetal.

Las Figuras muestran un comportamiento dinámico de la vegetación, que disminuye o aumenta en algunas unidades experimentales. El número de parcelas disminuyó en ambos casos debido a la cobertura vegetal alta que cubre las parcelas a estudiar y en otras al escaso crecimiento de la especie forrajera. Un factor determinante para el desarrollo de un cultivo según (Dedios 2009), corresponde a la estacionalidad climática, factor que pudo afectar en alguno de los tipos de pasto sembrados. Entre las características fundamentales para el adecuado crecimiento del rye grass es a una altitud entre 1.800 y 3.600 msnm, si bien por encima de los 3.000 msnm su crecimiento se reduce y a una temperatura entre 15 y 22 °C (Posada Ochoa, Cerón et al., 2013).



Figura 7: Mapa de NDVI (diciembre 2017).

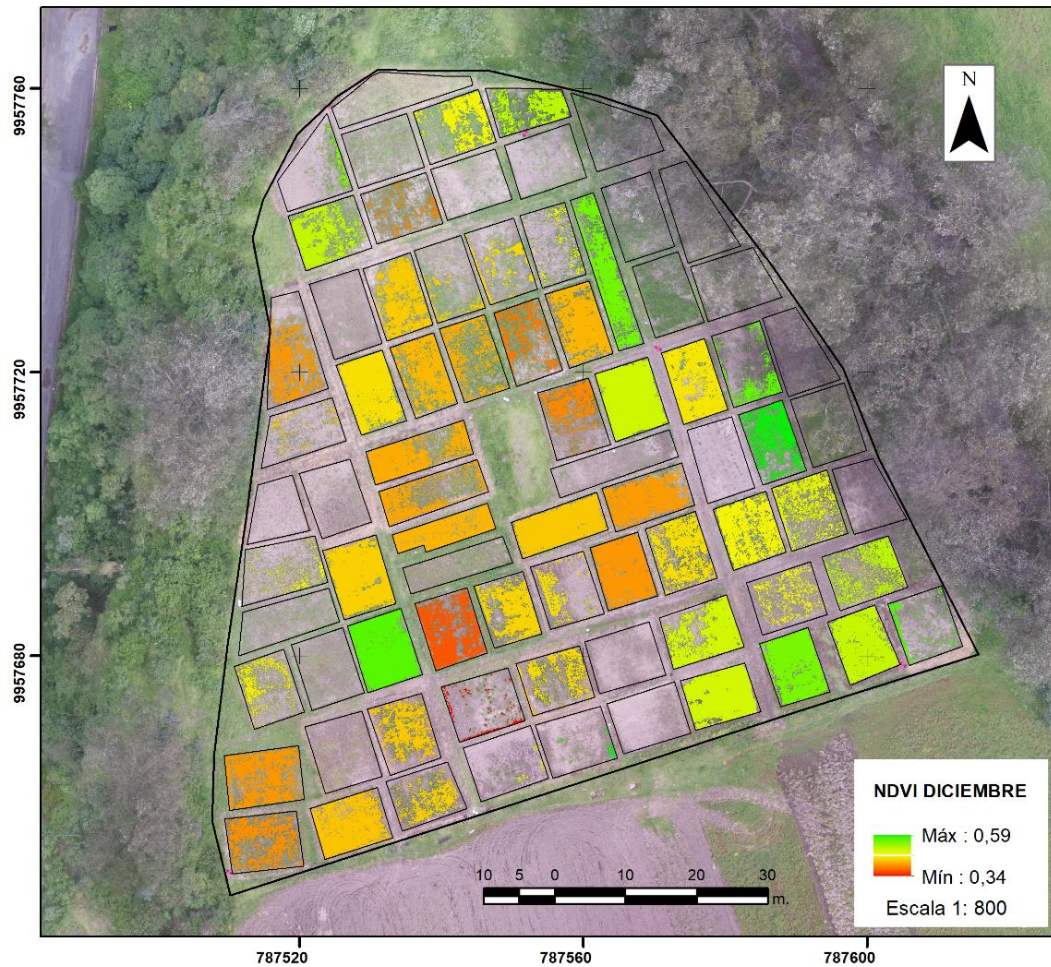


Figura 8: Mapa de NDVI (enero 2018).

En estos mapas multitemporales se diferencian de manera clara, el aumento del valor de NDVI especialmente de las parcelas 50 a 55. Un factor para este crecimiento y vigorosidad fue el tipo de cultivo sembrado, que para estas parcelas fue el rye grass. Esta especie es de rápida germinación y se adapta a suelos francos y arcillosos, aunque es preferible en suelos húmedos y fértiles (Cruz, Rodríguez et al., 2013).

CONCLUSIONES

Se obtuvo que a la hora de estudiar la correlación entre los factores morfológicos del predio (EMC) y el índice de vegetación NDVI, el Rey Grass Perenne alcanza valores próximos a 0.56 de r^2 en cambio el Rey Grass Anual, tiene valores en torno a 0.05 de r^2 , esto evidencia que el Rey Grass Anual es menos dependiente de los factores morfológicos del terreno, por tanto se puede adaptar de mejor manera en predios con mayor pendiente, menor insolación o con diferentes orientaciones. El Kikuyo en cambio no tuvo un buen desarrollo en ningún caso, esto puede ser atribuido al tipo de siembra realizado y a la pedregosidad existente en el suelo.

En cuanto a la correlación de los nutrientes del suelo con la respuesta del índice de vegetación, se pudo evidenciar que todos tienen una correlación negativa baja, pero en el caso del Hierro cuenta con correlación nula, es decir, para los niveles que se pudieron medir, no hubo una influencia directa de los nutrientes en el desarrollo del pasto.

El NDVI es apto para determinar el nivel de producción de la vegetación y sus cambios en el tiempo. Permite verificar el estado del cultivo y con una inversión pequeña en una lente modificada se

pueden hacer estimaciones del valor de NDVI. De esta forma se puede afirmar que el valor máximo de este índice se encontró en el cultivo rye grass anual con fertilización verificando que este tratamiento aumentó de 0,36 a 0,59, siendo la especie forrajera más vigorosa. Por otro lado, su mínimo valor fue de 0,35 a 0,42 con kikuyo sin fertilización.

En cuanto al porcentaje de crecimiento, se pudo evidenciar una correlación positiva alta (r^2 0.964) entre respuesta del NDVI y el porcentaje de crecimiento dentro de cada parcela, por tanto se puede deducir que el índice de NDVI permite explicar la variable crecimiento de pasto, con lo que se podría predecir la productividad del pasto en cuanto a superficie correctamente desarrollada, mediante la respuesta espectral en el rojo y el infrarrojo.

Las herramientas UAV son una buena alternativa para caracterizar el desarrollo del pasto de forma ágil y sin necesidad de tener contacto directo con el cultivo.

En general el Rye Grass es un tipo de pasto que se puede establecer en condiciones más desfavorables que el Kikuyo ya que presenta el valor más alto de NDVI para todas las condiciones de predio.

REFERENCIAS

- Asen, H., Burkart, A., Bolten, A. y Bareth, G., 2015. Generating 3D hyperspectral information with lightweight UAV snapshot cameras for vegetation monitoring: From camera calibration to quality assurance. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **108**, pp. 245-259.
- Ali, S.M. y Jassem, D.R., 2014. Monitoring Vegetation Areas by using Remote Sensing Techniques. *International Journal of Computer and Information Technology*, **3**(02), pp. 1-10.
- Bareth, G., Jung, A., Bendig, J., Gnyp, M.L., Michels, R., Aasen, H., Bolten, A. y Soukkamäki, J., 2015. Low-weight and UAV-based Hyperspectral Full-frame Cameras for Monitoring Crops: Spectral Comparison with Portable Spectroradiometer Measurements. *PFG Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, **2015**(1), pp. 69-79.
- Bianchini, G., Natali, C., Di Giuseppe, D. y Beccaluva, L., 2012. Heavy metals in soils and sedimentary deposits of the Padanian Plain (Ferrara, Northern Italy): characterisation and biomonitoring. *Journal of soils and sediments*, **12**(7), pp. 1145-1153.
- Cruz, M.C., Rodríguez, L.C., Viera, R.G., Mouso, J.P., Cabrera, D.M., Escobar, Y.T. y Socarrás, Y.C., 2013. Evaluación agronómica de cuatro nuevas variedades de pastos. *Revista de producción animal*, **25**(1), pp. 5.
- De La Casa, A., y Ovando, G., 2007. Integración del índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI) y del ciclo fenológico de maíz para estimar el rendimiento a escala departamental en Córdoba, Argentina. *Agricultura Técnica*, **67**(4), pp. 362-371.
- Dedios, N., 2009. Análisis espacial del comportamiento fenológico de la vegetación en la cuenca del río Chira usando imágenes de alta resolución espectral. *Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA* (1), **20**, **34**.
- García, J.L.L., 2002. *Fotogrametría Moderna*. Madrid-españa: Universidad Politécnica de Valencia.
- Gilabert, M.A., González-Piqueras, J., y García-Haro, J., 1997. Acerca de los índices de vegetación. *Revista de teledetección*, **8**(1), pp. 1-10.

- Grijalva, J., Espinosa, F. y Hidalgo, M., 1995. *Producción y utilización de pastizales en la región interandina del Ecuador*. INIAP Archivo Histórico.
- Hassan, M.A., Yang, M., Rasheed, A., Yang, G., Reynolds, M., Xia, X., Xiao, Y. y He, Z., 2019. A rapid monitoring of NDVI across the wheat growth cycle for grain yield prediction using a multi-spectral UAV platform. *Plant science*, **282**, pp. 95-103.
- Hernández, R.R., 1993. *La lombricultura y sus fundamentos*. Madrid: S. A. P. T. Publicaciones Técnicas.
- Honkavaara, E., Saari, H., Kaivosoja, J., Pölönen, I., Hakala, T., Litkey, P., Mäkynen, J. y Pesonen, L., 2013. Processing and assessment of spectrometric, stereoscopic imagery collected using a lightweight UAV spectral camera for precision agriculture. *Remote Sensing*, **5**(10), pp. 5006-5039.
- Karaburun, A., 2010. Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece watershed. *Ozean Journal of applied sciences*, **3**(1), pp. 77-85.
- Kim, D., Song, Y., Kim, G. y Kim, C., 2014. A study on the application of UAV for Korean land monitoring. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, **32**(1), pp. 29-38.
- Lussem, U., Hollberg, J., Menne, J., Schellberg, J. y Bareth, G., 2017. Using calibrated RGB imagery from low-cost UAVs for grassland monitoring: Case study at the Rengen Grassland Experiment (RGE), Germany. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **42**, pp. 229.
- Mahajan, U. y Raj, B., 2016 Drones for normalized difference vegetation index (NDVI), to estimate crop health for precision agriculture: A cheaper alternative for spatial satellite sensors, *International Conference on Innovative Research in Agriculture, Food Science, Forestry, Horticulture, Aquaculture, Animal Sciences, Biodiversity, Ecological Sciences and Climate Change (AFHABEC-2016)* 2016, pp. 38-41.
- Mejía-Taborda, A.C., Ochoa-Ochoa, R. y Medina-Sierra, M., 2014. Efecto de diferentes dosis de fertilizante compuesto en la calidad del pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hochst. Ex Chiov.). *Pastos y forrajes*, **37**(1), pp. 31-37.
- Näsi, R., Honkavaara, E., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Blomqvist, M., Litkey, P., Hakala, T., Viljanen, N., Kantola, T., Tanhuanpää, T. y Holopainen, M., 2015. Using UAV-Based Photogrammetry and Hyperspectral Imaging for Mapping Bark Beetle Damage at Tree-Level. *Remote Sensing*, **7**(11), pp. 15467-15493.
- Pajares, G., 2015. Overview y current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs). *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **81**(4), pp. 281-330.
- Park, C., Na, S., So, K. y Ahn, H., 2018. Development of field scale model for estimating barley growth based on UAV NDVI and meteorological factors, *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XX*, 2018 2018, International Society for Optics and Photonics, pp. 107831P.
- Paruelo, J.M., 2008. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Revista Ecosistemas*, **17**(3),.

- Posada Ochoa, S., Cerón, J.M., Arenas, J., Fernando Hamedt, J. y Álvarez, A., 2013. Evaluation of ryegrass (*Lolium* sp.) establishment in kikuyu grass (*Pennisetum clandestinum*) paddocks using zero tillage. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, **8**(1), pp. 23-32.
- Rouse Jr, J., Haas, R.H., Schell, J.A. y Deering, D.W., 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS.
- Stroppiana, D., Migliazzi, M., Chiarabini, V., Crema, A., Musanti, M., Franchino, C. y Villa, P., 2015 Rice yield estimation using multispectral data from UAV: A preliminary experiment in northern Italy, *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* 2015, IEEE, pp. 4664-4667.
- Villalobos, L. y Sánchez, J.M., 2010. Evaluación agronómica y nutricional del pasto ryegrass perenne tetraploide (*Lolium perenne*) producido en lecherías de las zonas altas de Costa Rica. I. Producción de biomasa y fenología. *Agronomía costarricense*, **34**(1), pp. 31-42.

VALORACIÓN ECONÓMICA DE LOS SERVICIOS AMBIENTALES DEL PARQUE ECOLÓGICO RECREACIONAL LA PERLA

ECONOMIC VALUATION OF ENVIRONMENTAL SERVICES OF THE LA PERLA ECOLOGICAL AND RECREATIONAL PARK

KAREN ASTUDILLO CHICAIZA¹, FABIÁN RODRÍGUEZ ESPINOSA^{1,2}

¹ Departamento de Ciencias de La Tierra y Construcción, Universidad De Las Fuerzas Armadas ESPE, Av. Gral. Rumiñahui s/n y Ambato, Sangolquí, Ecuador. kpastudillo@espe.edu.ec; ffrodriguez3@espe.edu.ec.

² Facultad de Economía, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Av. 12 de Octubre 1754 y Vicente Roca, Quito, Ecuador. frodriguez594@puce.edu.ec.

Recibido: 03 de Abril 2020

/ Aceptado: 08 de Junio de 2020

RESUMEN

El presente estudio valoró económicamente los servicios ambientales de recreación y almacenamiento de carbono que ofrece el bosque del Parque Ecológico Recreacional de Lago Agrio La Perla (PERLP) en la ciudad de Lago Agrio, Provincia de Sucumbios. El servicio de recreación se estimó mediante el método de Coste de viaje en el cual se realizaron encuestas de 20 preguntas a 378 turistas para determinar los gastos generados por el desplazamiento hacia la zona de recreación mediante el cálculo del excedente de consumidor. El almacenamiento de carbono se determinó mediante los índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de las diferentes coberturas vegetales existentes usando imágenes satelitales extraídas de Google Earth. Además se estimó la biomasa forestal del PERLP para obtener las toneladas de Dióxido de Carbono (CO₂) que almacena el bosque. El valor económico del servicio ambiental de recreación del parque fue de \$1'040.801,09, mientras que el del almacenamiento de carbono fue de \$ 213.523,57 almacenando aproximadamente 61.006,74 ton CO₂. El valor económico total de ambos servicios ambientales para el año 2018 fue de 1'254.324,66. Estos valores fueron analizados a través de la relación beneficio costo e indica que los beneficios por la protección del PERLP cubren 2,25 veces los costos de cuidado y mantenimiento del parque. Se recomienda estudios similares en otras áreas protegidas de gobiernos locales ya que los beneficios que se generan por estas áreas protegidas a la sociedad en general en general superan a los costos que los gobiernos incurren en declarar áreas protegidas.

Palabras clave: Biomasa, NDVI, valoración económica, almacenamiento de carbono, servicios ambientales.

ABSTRACT

This study estimated the economic valuation of the environmental services of recreation and carbon storages offered by the Parque Ecológico Recreacional de Lago Agrio La Perla (PERLP) located in the city of Lago Agrio, Sucumbios province. The environmental recreation service used the travel cost method. A

questionnaire was applied to 378 randomly selected visitors to determine their expenses to reach the recreation area: The carbon storage service was estimated using satellite images were used to determine the vegetation indices of normalized difference (NDVI) for existing vegetation cover. Forest biomass was estimated to obtain the tons of carbon dioxide stored by PERLP. The economic value of the park's environmental recreation service was US\$1,040,801.09, while carbon storage service economic value was US\$ 213,523.57 based on forestry certificates that the world bank pays per ton of carbon dioxide. The PERLP forest stores approximately 61,006.74 ton CO₂. The total economic valuation of both environmental services in the year 2018 was US\$1,254,324.66. Regarding Lago Agrio's investments in the PERLP, the benefit-cost showed 2.25 ratio meaning the benefits of having this local protected area are 2.25 times higher than the operation and maintenance costs. Similar studies should take place to show local governments the benefits to declare and invest in protected areas.

Keywords: Biomass, NDVI, economic valuation, carbon storage, environmental services.

INTRODUCCIÓN

Los bosques tropicales proveen muchos bienes y servicios importantes entre los que se destacan la recreación y esparcimiento, la enorme biodiversidad, la regulación de gases de efecto invernadero, y regulación climática, entre otros (Morales, Vélchez & Chazdon, 2012). Muchos estudios se han realizado en la búsqueda de dar valores monetarios a los bienes y servicios ambientales de áreas protegidas (Palacios et al., 2019; Rodríguez-Espinosa et al., 2018; Cadena et al., 2018; Rodríguez Espinosa et al., 2017; León et al., 2017; Espinosa et al., 2016; Vallejo Abuja y Rodríguez Espinosa, 2015; Zafrir y Rodríguez, 2014).

Existen varios tipos de bosques en el Ecuador como son el bosque seco andino, bosque seco pluvioestacional, bosque siempre verde andino montano, bosque siempre verde andino pie de monte, bosque siempre verde andino de ceja andina, bosque siempre verde de tierras bajas de la Amazonía, bosque tropical, bosque siempre verde de tierras bajas del Chocó, manglar, moretal (Mogrovejo, 2017). Los bosques tropicales presentan características en el ambiente muy particulares, como los describe Balvanera (2012), que incluye cambios diarios de temperaturas entre los 26° grados, grandes precipitaciones, en ocasiones hay meses que no se presentan lluvias. La zona tropical se caracteriza por tener en un período anual de rayos verticales del sol, generando energía solar alta así como elevadas transpiraciones de la vegetación y fuerte evaporación, en consecuencia se genera un clima bastante húmedo (Ceccon, 2014).

Los bosques tropicales generan una gran variedad de bienes y servicios ambientales desde la provisión de servicios básicos como alimentación, medicinas, vestido e insumos para la vivienda, hasta la purificación del agua y aire. Entre los servicios ambientales que prestan los bosques está el servicio de recreación y el servicio de absorción de uno de los más dañinos gases de efecto invernadero como es el dióxido de carbono, esta fijación de carbono lo realizan los bosques mediante el proceso de fotosíntesis fijando el carbono en la biomasa y liberando oxígeno (De la Peña, Rojas, & De la Peña, 2010).

Desde el año de 1992 en la Convención sobre el Cambio Climático en Brasil varios países acordaron tomar medidas para reducir las concentraciones de gases de efecto invernadero, luego en el protocolo de Kioto acordaron reducir en 5% dichas emisiones (Chambi Condori, 2001). De esta manera se han venido ejecutando diferentes compromisos que tienen que ver con el cuidado del medio ambiente, en especial los compromisos adquiridos por la República del Ecuador en el

Acuerdo de París en el año 2016, como por ejemplo su contribución en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero mediante la aplicación de políticas de conservación, gestión sostenible de los bosques y el aumento de las reservas forestales de carbono (MAE, 2016).

Los beneficios económicos que nos brindan las áreas naturales muchas veces son omitidos ya que son encubiertos con la ejecución de proyectos alternativos que son palpables a los ojos de la sociedad. Un camino viable para alcanzar el aprovechamiento sustentable de las áreas naturales es determinar el valor monetario de las funciones y servicios que ofrecen éstas áreas, mediante la valoración económica ambiental.

El objetivo de este estudio fue estimar el valor económico de los servicios ambientales de recreación y almacenamiento de carbono del Parque Ecológico Recreacional de Lago Agrio La Perla (PERLP), mediante la aplicación de los métodos de Coste de Viaje y Almacenamiento de Carbono. El parque Perla es uno de los principales atractivos turísticos de la ciudad de Lago Agrio, fue uno de los ganadores del premio verde concedido por el Banco de Desarrollo del Ecuador en el año 2016. El bosque del parque cuenta con grandes rasgos representativos naturales del sector en medio de una zona altamente intervenida por el hombre. Debido a que los bosques que se encuentran alrededor de la ciudad de Lago Agrio están desapareciendo de forma muy rápida gracias a la expansión de la frontera urbana y agrícola y sobre todo a la operación petrolera el GAD Municipal de Lago Agrio tomó la decisión de establecer este espacio como área de conservación con el fin de recuperar el área de bosque que rodea la laguna combinando actividades de recreación y conservación (Mestanza Ramón, 2017). Es así que en el año 2009 en la ciudad de Lago Agrio, se inauguró el Parque Perla como el primer lugar dedicado a la conservación de flora y fauna del sector.

El parque Perla posee gran diversidad de flora y fauna, en el parque se registraron 30 especies de flora, con un total de 600 individuos por hectárea. Las familias más representativas de la zona son Meliaceae, Melastomataceae y Lauraceae. En cuanto a la fauna se encontró que en el parque habitan 42 especies de mamíferos dentro de los cuales se encuentran monos, jaguares, guatusas, ardillas, puercos espines, tapires, murciélagos, perros de monte, entre otros (Mestanza Ramón, 2017).

METODOLOGÍA

ÁREA DE ESTUDIO

El Parque Perla está ubicado en la ciudad de Lago Agrio en la provincia de Sucumbíos Tiene una extensión aproximada de 120 hectáreas, dentro de éste se encuentra la laguna Perla (ver Figura 1) (Mestanza Ramón, 2017). El PERLP está ubicado en las coordenadas geográficas proyectadas UTM, con datum WGS 84, 18N, latitud 0°06'47"N longitud 76°54'34"W. El parque tiene un clima tropical húmedo a una altitud de 310 msnm, con una temperatura de 25 °C, y una precipitación de 2900 mm con una humedad relativa del 80%. El parque Perla está destinado a la conservación y recuperación del bosque tropical y proporciona servicios de recreación y turismo (Mestanza Ramón, 2017).

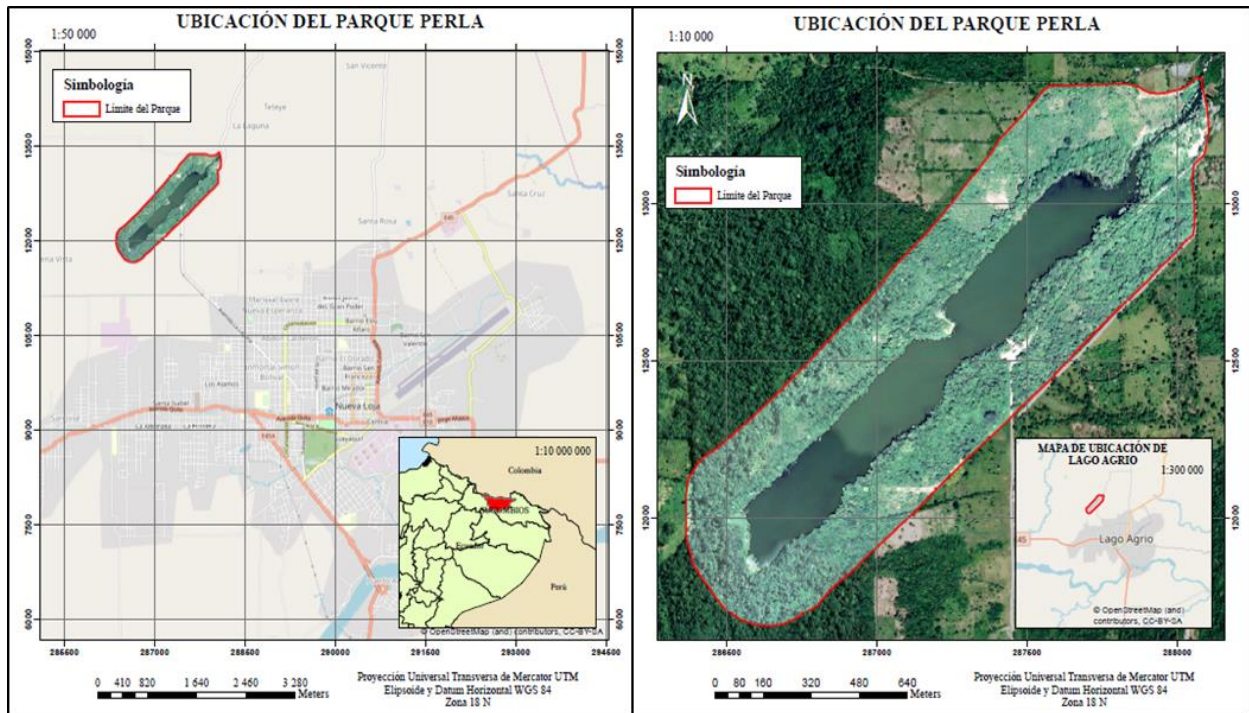


Figura 1. Zona de estudio.

DETERMINACIÓN DEL VALOR ECONÓMICO TOTAL

La Valoración Económica Ambiental (VEA) permite tener un indicador monetario que posibilite determinar el valor del medio natural, provocada por acción o actividad económica (Izko y Burneo, 2003; Pearce, 1992). El objetivo de la VEA es aportar para el desarrollo de políticas públicas que permitan un mejor manejo y utilización de los recursos, incluyendo la conservación del medio ambiente para garantizar un desarrollo sostenible (Osorio Múnera & Correa Restrepo, 2004).

Los valores de uso (VU) que incluye los valores de uso directo (VDU), indirecto (VIU), de opción (VO) y de no uso de los bienes y servicios ambientales (VNO) que incluyen los valores de legado (VL) y valores de existencia (VE) se sumarían entonces para formar el Valor Económico Total (VET), el cual se expresa de la siguiente manera (Wilsoft, 2018):

$$VET = VU + VNO = VDU + VIU + VO + VL + VE \quad (1)$$

Determinación del valor económico

El estudio se concentra en dos de los servicios ambientales que provee el bosque La Perla, uno es el servicio de recreación y estético, y el segundo sobre el almacenamiento de carbono. Para el servicio de recreación se utilizó el método de costo de viaje. Este método se utiliza como una aproximación para valorar los servicios recreativos determinando el gasto de cada individuo para disfrutar de dicho servicio (Izko y Burneo, 2003; Clawson and Knetsch, 1966).

Una vez establecido el gasto individual, se puede analizar la demanda de un determinado activo ambiental (por ejemplo, el número de visitas a un determinado espacio) en función de los cambios en el coste de disfrutarlo (Rosato and Defrancesco, 2002; McConnell and Strand, 1981; Clawson and Knetsch, 1966). En este caso, el número de visitas de cada individuo se definen como una función de los gastos de viaje y de las condiciones socioeconómicas del usuario (Lomas et al., 2015).

VALOR ECONÓMICO DEL SERVICIO AMBIENTAL RECREACIÓN

Método de Costo de Viaje

Existen tres maneras de aplicar el método de coste de viaje, dentro de los cuales se encuentran el coste de viaje zonal, modelos de elección discreta y el coste de viaje individual. El presente estudio se basó en este último, el costo de viaje individual debido a la insuficiente información de los visitantes en los registros del parque. El modelo se realizó a través de la aplicación de las encuestas a los visitantes del parque PERLP, éstos fueron elegidos al azar per un periodo de 4 semanas y el número de encuestados fue determinado obteniendo una muestra probabilística aleatoria a partir de los datos de visitantes anuales al parque (Grima, 2011). Las encuestas fueron aplicadas a 378 visitantes en un período de 4 semanas. El modelo matemático puede definirse como:

$$V_{ij} = f(P_{ij}, T_{ij}, G_{ij}Q_j, S_j, Y_i) \quad (2)$$

Donde:

- V_{ij} es el número de visitas por turista i al lugar recreativo j
- P_{ij} es el costo de viaje del turista i para llegar al lugar recreativo j
- T_{ij} es el costo de tiempo del turista i para llegar al lugar recreativo j
- G_{ij} es el gasto adicional durante el viaje del individuo i al lugar recreativo j
- Q_j es el disfrute percibido del lugar recreativo j
- S_j representa el conocimiento del turista de lugares que sean similares al lugar recreativo j
- Y_i es el ingreso económico mensual del turista i

Las encuestas tuvieron tres secciones, la primera sección consistió en preguntas que tenían que ver con las características socioeconómicas del encuestado, la segunda sección consistía en la descripción de las visitas al parque y en la tercera sección se respondían preguntas sobre la evaluación de los servicios del parque, es por eso que era de vital importancia realizar las encuestas a los visitantes que ya salían del parque.

Para evitar el sesgo de datos se elaboró un mapa en el cual se dividió los diferentes lugares alrededor del parque en cinco regiones como se muestra en la Figura 2.

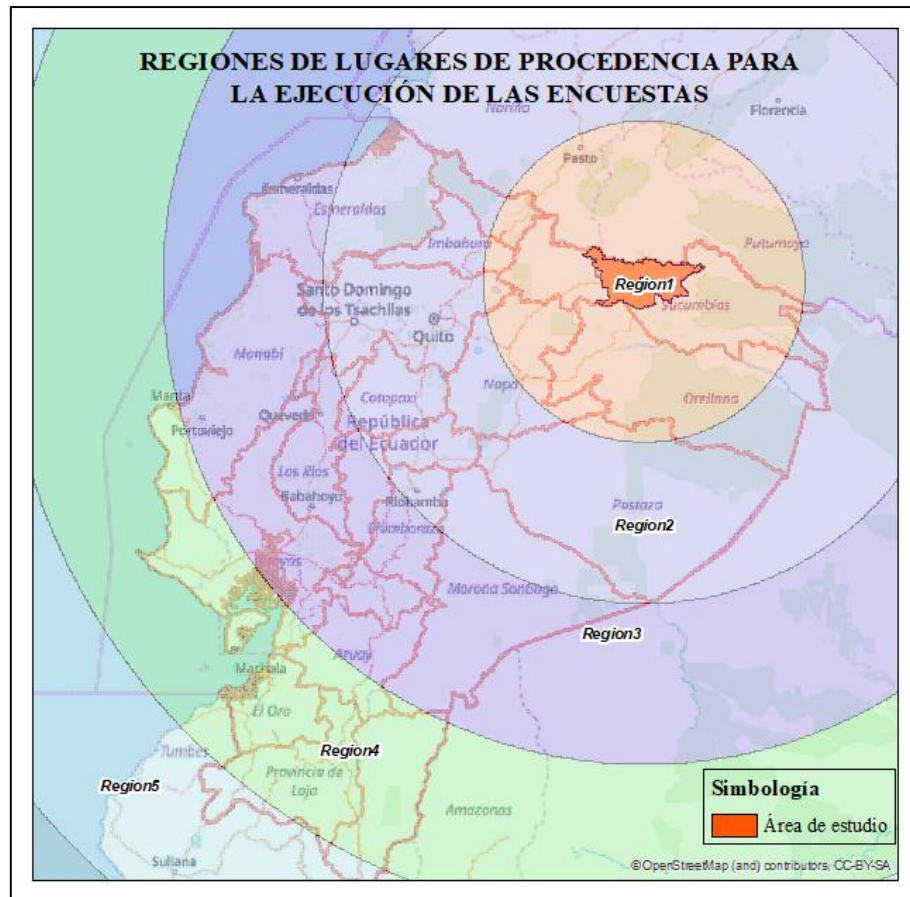


Figura 2. Clasificación de regiones de procedencia de los visitantes.

La distancia designada entre región y región es de 150 km, siendo la distancia de la zona de estudio hacia la región 1 de 150 km, de la zona de estudio hacia la región 2 de 300 km, de la zona de estudio hacia la región 3 de 450 km, de la zona de estudio hacia la región 4 de 600 km y finalmente de la zona de estudio hacia la región 5 de 700 km.

Basado en el modelo matemático general del método del costo de viaje individual (ver Ecuación 3) se desarrolló el modelo de regresión lineal obtenido con los datos de las preguntas realizadas en las encuestas:

$$\text{costo}_{\text{viaje}} = \beta_0 + \beta_1(n\text{visitas}) + \beta_2(\text{edad}) + \beta_3(\text{educación}) + \beta_4(\text{ingreso}) + \beta_5(\text{cpersonas}) + \beta_6(\text{tiempoviaje}) + \beta_7(\text{distancia}) + \beta_8(\text{región}) + \beta_9(\text{permanencia}) + \beta_{10}(\text{lugarsim}) + \beta_{11}(\text{proposito}) + \beta_{12}(\text{disfrute}) + \beta_{13}(\text{volveria}) \quad (3)$$

Las variables tomadas para la obtención del modelo de la demanda individual fueron:

- $\text{costo}_{\text{viaje}}$ es el costo en el que el individuo incurre para llegar al parque.
- $n\text{visitas}$ es el número de visitas que ha realizado el encuestado al parque.
- distancia es la distancia en kilómetros que recorre el individuo para llegar al parque.
- tiempoviaje es el número de horas que le toma llegar al individuo al parque.
- ingreso es el nivel de ingreso mensual de cada individuo.

- *edad* es la edad del encuestado.
- *disfrute* es el nivel de disfrute del parque, se mide del 1 al 10.
- *proposito* es una variable binaria (si o no) que define si el propósito del encuestado era visitar el parque.
- *cpersonas* es el número de personas que acompañan al encuestado.
- *lugarsim* es una variable binaria (si o no) que define si conoce o no un lugar similar al parque.
- *permanencia* es el tiempo de permanencia y disfrute dentro del parque

Costo de transporte

El costo de transporte se obtuvo mediante el cálculo de los kilómetros recorridos y el costo de combustible (Armijos Espinosa y Segarra Ortega, 2016). Los kilómetros recorridos se obtuvieron a partir del lugar de residencia del visitante y el costo de combustible dependiendo si el transporte utilizado era público o propio; si el transporte era vehículo propio, motocicleta o taxi se utilizó el valor vigente para gasolina extra para el año 2019 en el Ecuador de \$1,85 y si el transporte era público se utilizó el valor vigente para diésel de \$1,03. La multiplicación de estos datos nos proporcionó el gasto incurrido en transporte para llegar al parque Perla (ver Ecuación 4).

$$\text{Costo de transporte} = (\text{kilometros recorridos} \times 2) \times \left(\text{costo de combustible} \frac{\text{gal}}{\$} \right) \times (\text{consumo de galones de combustible por kilometro}) \quad (4)$$

Los datos de kilómetros recorridos depende de lugar de donde procedía el visitante, además se sabe que un automóvil consume aproximadamente 8 litros de combustible por cada 100 kilómetros (Armijos Espinosa y Segarra Ortega, 2016).

Tiempo de viaje

Para el costo de tiempo se utilizaron datos del ingreso económico mensual/hora, tiempo de viaje en horas y la permanencia dentro del parque en horas; el tiempo de viaje y permanencia dentro del parque fueron datos que se preguntaron en la encuesta.

Gastos adicionales

La variable gastos adicionales se refiere a lo que el visitante invirtió en el día de la visita al parque como comida, entretenimiento dentro del parque, entradas, etc. Esta información se obtuvo a través de las encuestas realizadas.

Excedente del consumidor

A partir de la información obtenida de las encuestas se estima el excedente del consumidor (*EC*) que representa el valor del servicio ambiental de recreación mediante el cálculo del área de la curva del excedente del consumidor por medio de su integral.

$$EC = \int_a^b f(x) \cdot dx \quad (5)$$

VALOR ECONÓMICO DEL SERVICIO AMBIENTAL ALMACENAMIENTO DE CARBONO

Para obtener el valor económico del servicio ambiental de almacenamiento de carbono del parque Perla se siguieron varios pasos, los cuales se pueden agrupar en dos partes. En la primera parte se trabajó con una imagen satelital del sensor Pleiades para obtener datos de los niveles digitales del índice de vegetación NDVI de la zona de estudio. En la segunda parte se trabajó en campo para la estimación de biomasa aérea de las distintas coberturas vegetales existentes en el parque, para así obtener una ecuación de regresión que relacione el nivel digital (ND) del NDVI con las toneladas de biomasa aérea del parque, tal como lo realizaron Rodríguez Cortes (2015) y Guascal Sanguña (2018).

Análisis de imágenes

La imagen satelital se la adquirió de la Compañía Consultora AGROPRECISIÓN Cía. Ltda. la cual ofrece servicios de consultoría, satelitales y geoservicios. Las características de la imagen satelital obtenida se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de la Imagen satelital

Identificación	Imagen satelital de la ciudad de Lago Agrio
Sensor	Pleiades
Fecha de la toma	17 de Octubre de 2018
Bandas	1. Azul
	2. Verde
	3. Roja
	4. Infrarrojos
Tamaño de pixel	0.5 m

Fuente: (ASTRIUM, 2012)

El índice NDVI es el más conocido y empleado para para medir el comportamiento radiométrico de la vegetación que se relaciona con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permitiendo determinar el nivel de vigorosidad de la planta. Existen varios estudios que relacionan a los índices de vegetación como el NDVI con la biomasa, como los trabajos realizados por Rodríguez Cortes (2015), Guascal Sanguña (2018), Gasparri et al. (2007), García Martín (2006). Su cálculo implica el uso de una fórmula de dos bandas, el infrarrojo cercano y el rojo (Díaz, 2015). En las imágenes generadas por el sensor Pleiades el NIR es la banda 4 y el Rojo es la banda 3. Para la obtención del índice NDVI en la zona de estudio se aplicó la Ecuación 6 en el Software Arcgis con la herramienta Raster Calculator.

$$NDVI = \frac{\varphi NIR - \varphi ROJO}{\varphi NIR + \varphi ROJO} \quad (6)$$

Estimación de la biomasa

La recopilación de la información para la estimación de la biomasa aérea se obtuvo a partir del estudio denominado “Actualización e identificación de flora y fauna del Parque Ecológico Recreacional de Lago Agrio” elaborado por Mestanza (2017). Asimismo, se realizó trabajo adicional de campo con la identificación de las coberturas vegetales existentes dentro de la zona como primer paso. En seguida se realizó la clasificación de los tipos de coberturas se utilizó la clasificación hecha por Rodríguez Cortes (2015) en el Parque Nacional Natural La Paya por medio del sistema de clasificación Corine Land Cover.

Para obtener los datos de biomasa aérea de cada una de las coberturas se siguió la metodología propuesta por Guascal Sanguña (2018). Esta metodología consiste en realizar parcelas de 100m x 100m, donde cada parcela se ubique en cada cobertura vegetal del parque para posteriormente dividirlos en cuatro partes. En cada subparcela de dimensiones 50m x 50m se ubicó una coordenada central y se tomaron medidas de diámetro a la altura del pecho (DAP) de 5 árboles aleatoriamente, siguiendo el diseño prpuesto por Guascal Sanguña (2018) tal como se muestra en la siguiente Figura 3.

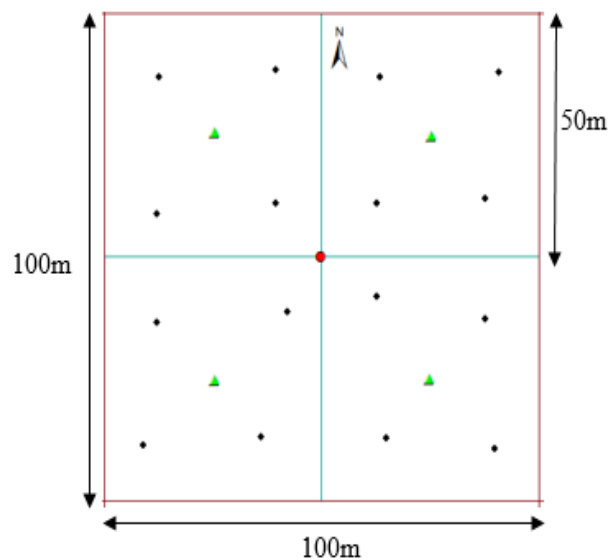


Figura 3. Selección de árboles para la toma de datos de DAP

El DAP se tomó a 1.3m del suelo como dice el estándar de medición para poder estimar la biomasa del área (Guascal Sanguña, 2018). Para la estimación de la biomasa aérea forestal (BA) se utilizó la ecuación propuesta por Chave et al. (2005) (citado en Basantes, 2018):

$$BA = \rho * \exp(-1.499 + 2.148 \ln(DAP) + 0.207(\ln(DAP))^2 - 0.0281 (\ln(DAP))^3) \quad (7)$$

Donde DAP es el diámetro del árbol en centímetros medido a la altura del pecho y ρ se refiere a la densidad de la especie arbórea (g/cm^3). Cabe recalcar que para la densidad se utilizó el valor promedio de $0.5646 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ obtenido por Molina (2016) en el bosque tropical amazónico del Yasuní tomó este valor promedio de las mediciones de densidad hechas en campo. En el estudio de Mestanza Ramón (2017) se supo que una hectárea de bosque en el parque Perla existen

aproximadamente 600 individuos como se muestra en la Tabla 2, de tal manera que para la estimación de la biomasa en cada parcela de estudio de 100m x 100m se obtuvo el promedio de biomasa por individuo y se multiplico por el valor de 600 para obtener la biomasa total en cada hectárea estudiada.

Tabla 2. Especies arbóreas del Parque Perla

Familia	Especies	Nombre común	Ind/ha
MELIACEAE	<i>Guarea kunthiana</i>	Colorado	110
MELASTOMATACEAE	<i>Miconia</i> sp.	Miconia	50
LAURACEAE	<i>Nectandra guararipo</i>	Jigua	45
MIMOSACEAE	<i>Inga</i> spp	Guabo	40
SAPOTACEAE	<i>Chrysophyllum argenteum</i>	Caimitillo	40
CECROPIACEAE	<i>Pourouma minor</i>	Uva De Monte	35
FABACEAE	<i>Acacia glomerosa</i>	Guarango	25
ARECACEAE	<i>Bactris</i> spp.	Palma	20
LECYTHIDACEAE	<i>Grias</i> sp.	Huevo De Burro	20
MORACEAE	<i>Castilla tunu</i>	Cauchillo	20
MYRISTICACEAE	<i>Virola elongata</i>	Sangre de Gallina	20
ANACARDIACEAE	<i>Spondias mombin</i>	Obo	15
ELAEocarpaceae	<i>Sloania grandiflora</i>	Achotillo	15
LAURACEAE	<i>Ocotea</i> spp.	Canelo	15
SAPOTACEAE	<i>Pouteria multiflora</i>	Caimito	15
CLUSIACEAE	<i>Symphonia globulifera</i>	Azufre	10
ARECACEAE	<i>Iriartea deltoidea</i>	Pambil	10
EUPHORBIACEAE	<i>Croton lechleri</i>	Sangre de Drago	10
FABACEAE	<i>Faramea</i> spp.	Cabo de Hacha	10
LAURACEAE	<i>Nectandra membranacea</i>	Aguacatillo	10
MORACEAE	<i>Brosimum utile</i>	Sandi	10
MYRTACEAE	<i>Calyptanthus</i> sp.	Limonsillo	10
VOCHYSIACEAE	<i>Vochysia ferruginea</i>	Tamburo	10
CARICACEAE	<i>Jacaratia spinosa</i>	Papayuelo	5
FABACEAE	<i>Dussia lehmannii</i>	Poroton	5
MYRISTICACEAE	<i>Virola duckei</i>	Coco	5
MYRISTICACEAE	<i>Otoba</i> spp.	Guapa Parota	5
TILIACEAE	<i>Apeiba membranacea</i>	Peine De Mono	5
VOCHYSIACEAE	<i>Erismia uncinatum</i>	Arenillo	5
VOCHYSIACEAE	<i>Vochysia ferruginea</i>	Tamburo	5
Número total de individuos			600

Para obtener la ecuación que relacione la biomasa de cada cobertura del parque con los niveles digitales del NDVI del parque se aplicó la metodología propuesta por Rodríguez Cortes (2015). Ésta genera una ecuación de regresión que expresa la variación de la biomasa arbórea con

los niveles digitales del índice de NDVI. La ecuación (ver Ecuación 8) tiene como variable dependiente a las toneladas de biomasa por hectárea y como variable independiente a los ND del índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

$$y = ax^2 + bx + c \quad (8)$$

Ya con la ecuación de regresión generada se reemplazaron los valores de los niveles digitales del NDVI de las demás hectáreas del parque para obtener la biomasa por hectárea de la totalidad del parque. No se tomó en cuenta la laguna ya que en el índice NDVI la cobertura de agua refleja valores, y obviamente no existen árboles en esta zona del parque (Figura 4).

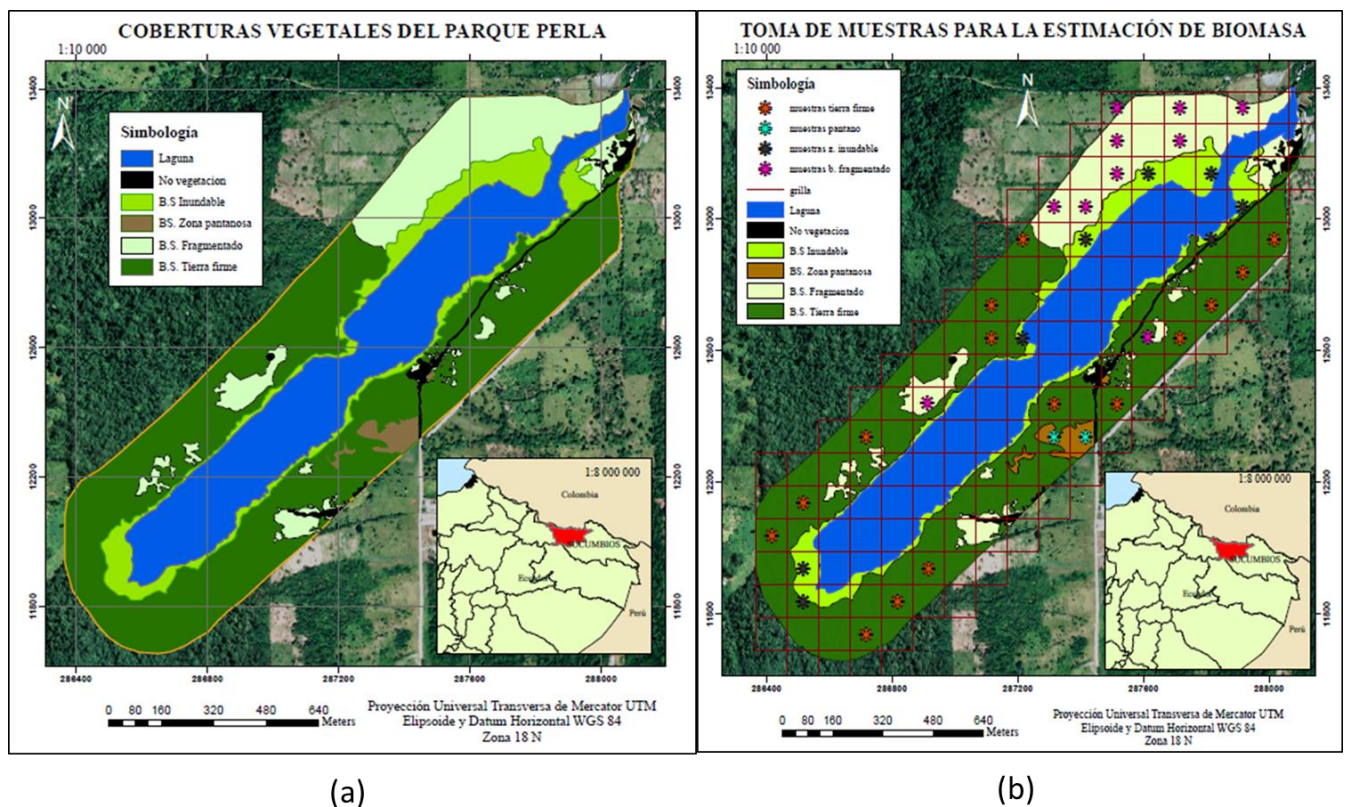


Figura 4. (a) Cobertura vegetal, (b) Ubicación de las muestras para determinación de biomasa

El cálculo del contenido de carbono se debe usar un factor de 0,5 para transformar de biomasa a carbono, tal es el caso de Rognitz et al., (citado en Guascal Sanguña, 2018) quien sostiene que el contenido de carbono corresponde al 50% de biomasa. De tal manera que en este estudio se utilizó dicho factor para transformar de biomasa a carbono.

La estimación del volumen de dióxido de carbono (CO_2) se utilizó la ecuación 9 recomendada por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) (citado en Guascal Sanguña, 2018) para comparar emisiones de gases de efecto invernadero.

$$CO_2 \text{ Total} = C * 3,67 \quad (9)$$

Donde:

- C = Contenido de Carbono
- 3,67 = factor de transformación

Finalmente, la determinación del valor económico del servicio ambiental de almacenamiento de carbono del parque Perla se obtuvo a partir de los valores negociados por el Banco Mundial en los certificados forestales. Este valor es de \$3,50 por tonelada de CO_2 (De la Peña et al., 2010).

RELACIÓN BENEFICIO COSTO

La relación beneficio costo (BC) es la mejor para evaluar inversiones públicas como las realizadas por el GAD de Lago Agrio y esencial para determinar los beneficios económico de PERLP (Zerbe et al., 2010). Se estimó la relación BC para comparar los beneficios generados por los dos servicios ambientales y las inversiones del GAD Lago Agrio y los costos de mantenimiento y operación. La relación se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{b_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{c_t}{(1+r)^t}} \quad (10)$$

Donde, b_t son los beneficios obtenidos por los dos servicios ambientales en el período de tiempo del estudio, c_t es el costo de la inversión y los costos de mantenimiento y operación, r es la tasa descuento, y t es el periodo de tiempo. . Para determinar el indicador del costo de la relación BC se obtuvo información de todos los gastos del Parque Perla en el año 2018 como son sueldos, telecomunicaciones, energía, guardianía, reparaciones, transporte, etc. Esta información fue facilitada gracias al departamento de Contabilidad del GAD Municipal de Lago Agrio

RESULTADOS

SERVICIO ESTÉTICO Y RECREATIVO

Los resultados muestran que las variables con significancia estadística son ingresos, cantidad de personas, distancia, región de proveniencia, permanencia en el parque, y disposición a visitar nuevamente el parque (Tabla 3).

Tabla 3 Valores de la regresión

Variable	Valor β	Significancia
(Constante)	4,606 (1,71)	*
EDAD	0,177 (0,69)	
EDUCACION	-0,171 (-0,63)	
INGRESO	5,553 (17,54)	***
NVISITAS	-0,151 (-0,84)	
CPERSONAS	1,043 (14,42)	***
TIEMPOVIAJE	0,068 (9,83)	***
DISTANCIA	0,103 (9,95)	***
REGION	-8,021 (-4,26)	***
PERMANENCIA	4,114 (9,60)	***
LUGARSIM	0,155 (0,26)	
PROPOSITO	-0,304 (-0,67)	
DISFRUTE	-0,094 (-0,57)	
VOLVERÍA	-4,421 (-3,26)	***
R2 ajustado	0,921	
Estadística F	546,080	***

Ingresos (0,000) fue estadísticamente significativo y el coeficiente (5,553) nos indica a mayor ingreso del visitante mayor es el gasto para llegar al parque. El número de acompañantes (0,000) también es estadísticamente significativo y el coeficiente (1,043) dice que mayor número de acompañantes resulta en un mayor gasto. El tiempo de viaje (0,000) fue estadísticamente significativo y el coeficiente (0,068) nos dice que mayor tiempo de viaje expresa mayor gasto. Asimismo, distancia (0,000) fue estadísticamente significativo y el coeficiente (0,103) nos indica que a mayor distancia mayor es el gasto. Por otro lado, el número de visitas (0,402) no fue

estadísticamente significativo (Tabla 3), sin embargo el valor del coeficiente (-0,151) nos indica que a mayor gasto para llegar al parque, menor es el número de visitas al mismo.

El valor del servicio ambiental estético y recreativo se estimó a partir del excedente del consumidor a partir de los valores expresados en las encuestas. El excedente del consumidor para la muestra de visitantes al parque Perla se muestra en la Figura 5.

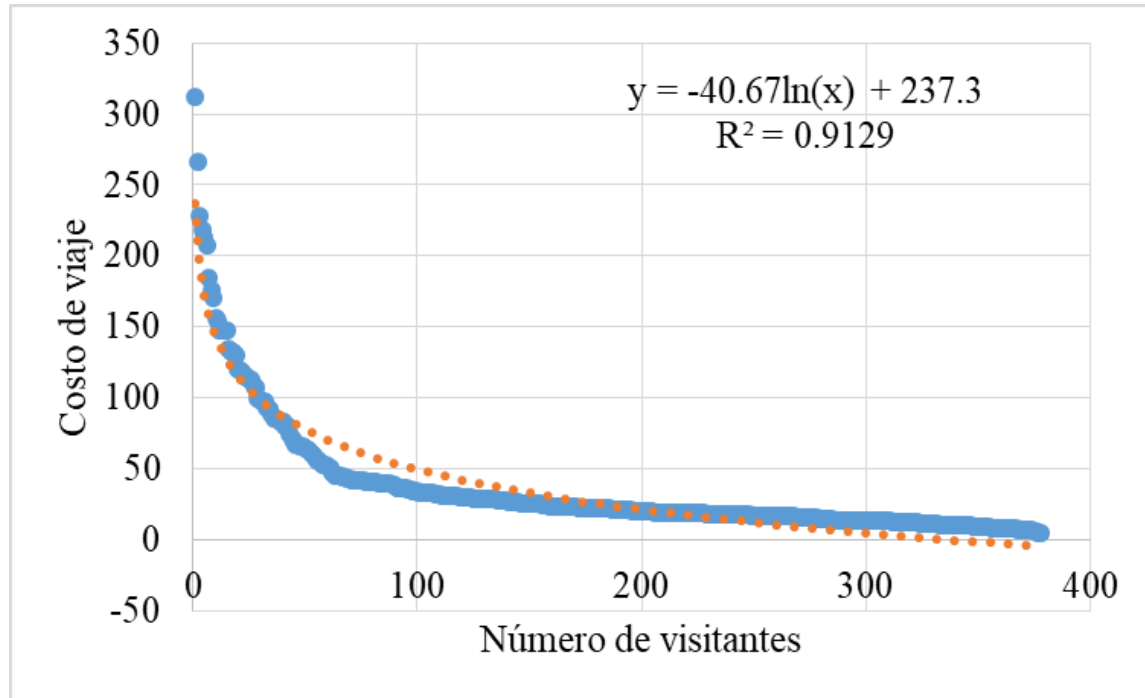


Figura 5. Excedente de consumidor

El excedente del consumidor está representado por el área por debajo de la curva, y se estima a partir de su integral de la ecuación 5.

$$EC = \int_1^{378} (-40,67 \ln(x) + 237,3) dx \quad (11)$$

$$EC = \$ 13.556,02$$

El valor obtenido del excedente de consumidor estimado es de \$ 13.556,02 para la muestra de 378 visitantes, de tal forma que el valor del beneficio económico del servicio de estético y recreación de todos los visitantes del parque Perla alcanza US\$ 1'040.801,09 para el año 2019.

SERVICIO DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO

En el PERLP se determinaron 5 tipos de coberturas vegetales como se muestra en la Figura 4. A partir de la determinación de la cobertura vegetal, se estimó el NDVI siguiendo el procedimiento ya establecido por Rodríguez Cortez (2015) y aplicando las ecuaciones 6 y 7. Los valores entre -1 a 0 muestran coberturas referidas a agua, construcciones y suelo desnudo, mientras que valores entre 0 a 1 muestra la vegetación (Figura 6).

De los datos obtenidos de las parcelas estudiadas para los tipos de bosque se obtuvieron el valor en toneladas de la biomasa para cada NDVI en las diferentes hectáreas del PERLP. La base de la biomasa estimada ayudó a obtener la ecuación polinómica de la biomasa para el bosque protector $y = -4596 + 16006x - 12819x^2$ con un R^2 ajustado de 0,9068, lo que indica que el modelo explica más del 90 por ciento de la muestra. El modelo de la regresión permitió establecer el valor en toneladas de la biomasa para cada NDVI identificado en las diferentes hectáreas del parque Perla como se muestra en la tabla 4.

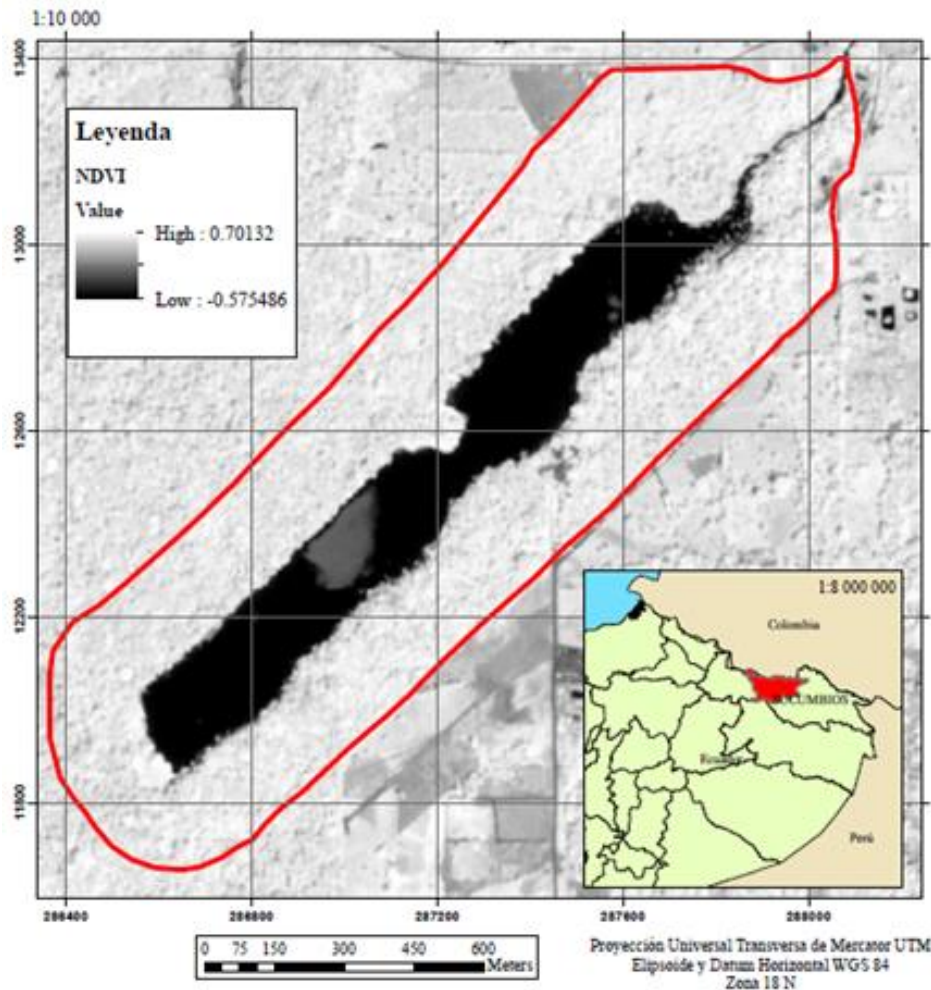


Tabla 4. Datos de Biomasa por tipo de cobertura en el PERLP

Cobertura	Biomasa (Ton/ha)	NDVI
Bosque secundario de tierra firme	377,72	0,5821
Bosque secundario fragmentado inundable	342,16	0,5419
Bosque secundario de zona pantanosa	267,19	0,5325
Bosque secundario fragmentado	216,35	0,5023

A partir de la estimación de la biomasa para cada NDVI se transformó en toneladas de carbono almacenadas en el bosque protector mediante la aplicación de la ecuación 9 recomendada por el IPCC (Tabla 4).

Tabla 4. Toneladas de Carbono en el bosque del Parque Perla

Total de Biomasa (Ton)	33.246,18
Carbono (Ton)	16.623,09
Dióxido de Carbono CO_2 (Ton)	61.006,74

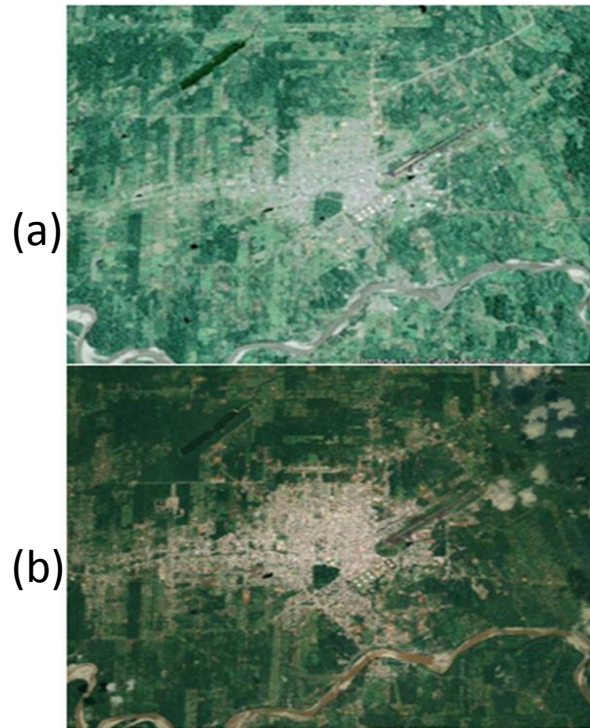
A partir de la estimación del CO_2 almacenado, se estimó el valor del mercado del carbono almacenado en el PERLP mediante los certificados forestales otorgados por el Banco Mundial que tiene un valor de US\$ 3,5 CO_2^{-1} para obtener un valor del servicio de almacenamiento de carbono de US\$ 213.523,57.

RELACIÓN BENEFICIO COSTO

El estimado de ambos servicios ambientales, tanto el almacenamiento de carbono como el de estética y recreación, del parque Perla es de US\$ 1'254.324,66 por año y permite evaluar si la política del GAD Municipal de Lago Agrio de crear y conservar una parte de su bosque tropical fue acertada o no a través de calcular la relación beneficio costo. Los costos de inversión, mantenimiento y operación del PERLP fueron de \$ 556.745,52 para el año 2018. De tal forma que podemos obtener la relación costo beneficio aplicando la ecuación 10.

$$RBC = \frac{\text{Beneficios}}{\text{Costo}} = \frac{\$ 1\,254.324,26}{\$556.745,52} = 2,25$$

La relación beneficio/costo BC es de 2,25, lo cual indica, que los beneficios cubren 2,25 veces los costos monetarios del mantenimiento y cuidado del PERLP. En la figura 7 se puede apreciar que ha existido un beneficio adicional, que es la recuperación natural del bosque al comparar (a) antes de la declaratoria de bosque protector, y (b) 10 años después.



Fuente: (USGS, 2019)

Figura 7. Beneficios de la conservación, (a) Bosque la Perla antes de la declaración de bosque protector; (b) 10 años después de la declaratoria

CONCLUSIONES

El objetivo de este estudio fue obtener el valor económico del beneficio que el parque PERLP brinda a los ciudadanos de Lago Agrio para que así las autoridades competentes de la ciudad le den la importancia debida a las áreas protegidas de la región y no permitan que la frontera urbana se amplíe cada día más hacia las áreas naturales y destruyan estos sitios que son vitales para mantener el equilibrio.

Los resultados demuestran demostrar que las inversiones de los gobiernos locales en conservación de áreas verdes y recreación generan beneficios. La relación beneficio/costo es de 2,25, es decir cada dólar que el Gobierno Descentralizado de Lago Agrio invirtió en su parque ha rendido beneficios económicos y financieros.

El valor económico ambiental total de los servicios ambientales de uso y recreación y de almacenamiento de carbono del parque fue de \$ 1 254.324,66. De los cuales, el valor más importante en términos monetarios y financieros es el del valor económico del servicio de uso y recreación del parque Perla que por medio de la aplicación del método de costo de viaje alcanzó un valor \$ 1 040.801,09. El valor económico del servicio ambiental de almacenamiento de carbono del PERLP mediante la utilización de índices de vegetación fue de \$ 213.523,57. Este valor es una estimación sobre la base de los precios de certificados de reducción de emisiones del Banco Mundial. Si bien este valor es menor, hay que tomar en cuenta que solo se estimó a partir del área declarada del bosque protector. Además de los beneficios económicos, ha existido una recuperación aún mayor de bosque tropical en la región de Lago Agrio, por lo que la estimación del servicio de almacenamiento de carbono podría ser mayor.

Las encuestas mostraron que el 51,9% de los visitantes corresponde al sexo femenino y el 48,10% corresponde al sexo masculino. La edad promedio de los encuestados es de 36 años y la mayoría de personas que visitan el parque Perla han cursado solo el Bachillerato; pero en niveles altos de educación como universitaria y post grado el género masculino es el más sobresaliente. Las personas que tienen un mayor ingreso económico son los que registran más visitas y son las que invierten más en el costo de viaje hacia el parque Perla.

Los tipos de cobertura vegetal identificados en el parque Perla son: Bosque secundario de tierra firme, Bosque secundario inundable, Bosque secundario de zona pantanosa, Bosque secundario fragmentado. Los valores del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) identificados en cada tipo cobertura fueron para bosque secundario de tierra firme 0,5821, para el bosque secundario fragmentado inundable 0,5419, para la cobertura de bosque secundario de zona pantanosa 0,5325 y para bosque secundario fragmentado de 0,5023.

El número de toneladas de dióxido de carbono fue de 61.006,74 ton por año. Finalmente, la relación beneficio costo indica que los beneficios por la protección del parque Perla cubren 2,25 veces los costos de cuidado y mantenimiento del parque. Este valor debería incentivar a los gobernantes del Gobierno Descentralizado de Lago Agrio a adquirir mayores áreas de bosque tropical como las adyacentes al bosque ecológico y de recreación La Parla para ampliar aún más las actividades recreativas que ofrece el parque.

El estudio demuestra de manera general que los beneficios que se generan en las áreas naturales a la sociedad en general a través de sus bienes y servicios ambientales superaran a los costos que las autoridades incurren en declarar áreas protegidas.

REFERENCIAS

- Armijos Espinosa, R. I., y Segarra Ortega, Y. E. (2016). Aplicación de los Métodos de Costo de Viaje y Valoración Contingente para determinar la Disposición a Pagar para la Conservación del Recurso Hídrico del Parque Nacional Cajas de la Ciudad de Cuenca. Cuenca, Ecuador.
- ASTRIUM. (2012). Pléiades Imagery User Guide. 2.0.
- Balvanera, P. (2012). Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Ecosistemas*, 133-147.
- Basantes, K. (2018). Análisis Dasométrico Aplicando Tecnología Escáner Láser Terrestre y Técnicas Convencionales para la Estimación de Biomasa Aérea en el Bosque La Armenia. Sangolquí, Ecuador.
- Cadena, A. G., Echeverría, D., Fierro Romero, L., Vargas, K., y Fabián Rodríguez Espinosa. 2018. Precios de mercado como medio de valoración de los beneficios ambientales de las reservas marino costeras del Ecuador. *Revista Geoespacial*, 15 (1): 60-78. <http://geoespacial.espe.edu.ec/wp-content/uploads/2018/01/Geoespacial15.1.pdf>.
- Ceccon, E. (2014). Restauración en bosques tropicales: Fundamentos ecológicos, prácticos y sociales. Bogotá: Ediciones Díaz Santos.
- Chambi Condori, P. P. (2001). Valoración Económica de Secuestro de Carbono mediante simulación aplicado a la zona boscosa del Río Inambari y Madre de Dios. Perú: Instituto de Investigación y Capacitación para el Fomento de Oportunidades Económicas con Base en la Conservación de Recursos Naturales.
- Clawson, M. and Knetsch, J., 1966. *Economics of Outdoor Recreation*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.

- De la Peña, A., Rojas, C. A., & De la Peña, M. (2010). Valoración económica del manglar por el almacenamiento de carbono en Ciénaga Grande de Santa Marta. *Clío América*, 133 - 150.
- Díaz, J. (2015). Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. Trabajo de fin de máster. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.
- Espinosa, J., Rodríguez Espinosa, F., & Cartuche, L. (2016). Valoración Económica del uso recreativo y ecosistémico del Parque Nacional Podcarpus (PNP), por medio del método de costo de viaje. *Geoespacial*, 1-13. Obtenido de Revista Geoespacial: <http://geoespacial.espe.edu.ec/wp-content/uploads/2017/01/Geoespacial13.2.pdf>
- García Martín, A., Pérez Cabello, F., & De la Riva Fernández, J. (2006). Evaluación de los Recursos de Biomasa Residual Forestal Mediante Imágenes del Satélite Landsat de SIG. *GeoFocus (Artículos)*, 6, 205-230.
- Gasparri, N. I., Parmuchi, M. G., Bono, J., Karszenbaum, H., & Montenegro, C. L. (2007). Utilidad de imágenes Landsat 7 ETM+ de diferentes fechas para la estimación de biomasa aérea en bosques subtropicales secos de Argentina. Mar de la Plata, Argentina: Congreso de la Asociación Española de Teledetección.
- Grima, P. (2011). *La certeza absoluta y otras ficciones los secretos de la estadística*. Editec. España.
- Guascal Sanguña, E. L. (2018). Análisis de la estimación de biomasa forestal mediante imágenes radar y vehículos aéreos no tripulados -UAV del Parque Metropolitano La Armenia. Sangolquí, Ecuador.
- Izko, X. y Burneo, D. (2003). Herramientas para la Valoración y Manejo Forestal Sostenible de los Bosques Sudamericanos. UICN-Sur
- León, P., Tapia, E., y Rodríguez, F. 2017. Valor económico del almacenamiento de carbono en los páramos de la reserva ecológica El Ángel. *Revista Geoespacial*, vol.14 (1), 69-86.
- McConnell, K and I. Strand, 1981. *Measuring the cost of time in recreation demand analysis* American Journal of Agricultural Economics, 61:153-156.
- MAE. (2016). Ministerio del Ambiente. Áreas Protegidas del Ecuador.
- Mestanza Ramón, C. (2017). Estudios de Actualización e Identificación de Flora y Fauna Parque Ecológico Recreativo Lago Agrio Perla. Lago Agrio, Ecuador.
- Mogrovejo, P. (2017). Bosques y cambio climático en Ecuador. Quito, Ecuador: Universidad Andina Simón Bolívar.
- Morales, M., Vílchez , B., & Chazdon , R. (2012). Diversidad y estructura horizontal en los bosques tropicales del Corredor Biológico de Osa; Costa Rica. Cartago: Instituto de tecnología Costa Rica
- Osorio Múnera, J. D., & Correa Restrepo, F. (2004). Valoración económica de costos ambientales: Marco conceptual y métodos de estimación. *Semestre Económico*, 7, 59-193.
- Palacios Orejuela, I.F., Castro Benavides, B.S., y Rodríguez Espinosa, F. 2019. Almacenamiento de carbono como servicios ambiental en tres reservas naturales del Ecuador. *Revista Geoespacial*, 16(1): 1-14. <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-geoespacial/article/view/1275/937>
- Pearce, D. (1992). Economic Valuation and the Natural World. Centre for Social and Economic Research on the Global Environment Working Paper for the World Development Report 1992, London, UK
- Rodríguez Cortes, Á. N. (2015). Estimación de Biomasa Arbórea por Medio de Índices de Vegetación para El Parque Nacional Natural La Paya. Bogota DC., Colombia.

- Rodríguez-Espinosa, F., Galarraga, R., Salazar-Córdova, R., Narváez, N., y Ananganó-Ayala, P. 2018. Beneficios económicos de la conservación de las áreas protegidas andinas. *Revista Geoespacial*, 15(2): 112-126. <http://geoespacial.espe.edu.ec/wp-content/uploads/2018/07/Geoespacial15.2.pdf>.
- Rodríguez Espinosa, F., Toulkeridis, T., Salazar Martínez, R., Cueva Girón, J., Taipe Quishpe, A., Vernaza Quiñonez, L., Padilla Almeida, O., Mato, F., Cruz D'Howitt, M., Parra, H., Sandoval, W., and Rentería, W. 2017. Economic Valuation of Recovering Natural Protection with Concurrent Relocation of the Population Threatened by Tsunami Hazards in Central Coastal Ecuador. *Science of Tsunami Hazards*, 36 (4): 296-306.
- Rosato P. y Defrancesco E. 2002. *Individual Travel Cost Method and Flow Fixed Cost*. Fondazione Eni Enrico Mattei, Documento de Trabajo No. 56. 25 pp.
- Vallejo Albuja, J. y Rodríguez Espinosa, F. (2015). Valoración de los Beneficios que del Parque Metropolitano de Quito. *Revista Geoespacial* No. 12, pp. 1-14.
- Wilsoft. (2018). Métodos de valoración de los servicios ambientales desde la economía ambiental. Obtenido de Wilsoft: <http://www.wilsoft-la.com/metodos-de-valoracion-de-los-servicios-ambientales-desde-la-economia-ambiental/>
- Zafir R. y Rodríguez, F. (2014). Valoración Económica del Uso Recreativo de la Reserva Geobotánica Pululahua a través del Método del Costo de Viaje. *Revista Geoespacial* No. 11, pp. 16-27.
- Zerbe, R.O Jr, T.B. Davis, N. Garland, and T. Scott. 2010. Toward Principles and Standards in the Use of Benefit-Cost Analysis. Benefit Cost Analysis Center, University of Washington. Seattle WA.115pp.