

Variaciones espaciales y temporales de dos índices espectrales de vegetación en el Jardín Botánico Nacional de Cuba, durante 1984-2020

Spatial and temporal variations in two vegetation spectral indexes in the National Botanic Garden of Cuba, during 1984-2020

Fermín Lázaro Felipe Tamé¹ & Dennis Denis Ávila²

¹Jardín Botánico Nacional, Universidad de La Habana, Carretera "El Rocío" km 3½, Calabazar, Boyeros, La Habana, Cuba. C.P. 19230. ²Departamento de Biología Animal y Humana, Facultad de Biología, Universidad de La Habana, Calle 25, N° 455, e/ J e I, Vedado, Plaza de la Revolución, La Habana, Cuba. CP. 10400. *Autor para correspondencia (e-mail: ffelipe94@gmail.com)

RESUMEN

El Jardín Botánico Nacional de Cuba presenta 26 zonas (colecciones al aire libre), con representación florística de diferentes áreas fitogeográficas mundiales, que requieren un considerable esfuerzo para su mantenimiento. En el presente trabajo se caracterizó espectralmente a partir de imágenes satelitales la cobertura vegetal en las distintas zonas del jardín y se describieron sus tendencias desde 1984 hasta 2020. Con mapas digitalizados y composiciones de valores medios de NDVI y EVI por década, a partir de 535 imágenes *Landsat* (4/5/7/8), se extrajeron los valores en 2 455 puntos aleatorios, distanciados a más de 30 m. En el período analizado el jardín tuvo un NDVI medio de 0,635, con valores extremos entre 0,417 y 0,805. Las zonas de mayor NDVI fueron el Bosque Semicaducifolio Central, el Pinar, el Monte Seco y el Bosque Semicaducifolio Oriental y para el EVI fueron el Bosque Semicaducifolio Oriental, las zonas de América Central, América del Sur y África. En la última década, la mediana del NDVI por zonas varió entre 0,808 en la zona Mogote hasta 0,613 en la zona de Plantas Cultivadas, y el máximo EVI estuvo en la Manigua Costera con 0,537. Los patrones de variación difirieron entre zonas, en puntos con cobertura arbórea y sin ella, los que generalmente aumentaron al alejarse de los viales. La tendencia histórica fue a un aumento marcado y sostenido en los valores de los índices, lo cual sugiere una evolución positiva de la cubierta vegetal. Los resultados obtenidos pueden contribuir al manejo adecuado de las colecciones del Jardín Botánico Nacional de Cuba.

Palabras clave: colecciones de plantas vivas, EVI, jardines botánicos, NDVI, sensores remotos

ABSTRACT

The Cuban National Botanic Garden is divided in 26 zones, with floristic representation from different phytogeographical regions, requiring a considerable effort for its maintenance. In the present paper, based on satellite imagery, the vegetation cover was spectrally characterized in the different areas of the garden and its trends since 1984 to 2020 were described. Using digitized maps and mean composition maps of NDVI and EVI per decade, from 535 *Landsat* (4/5/7/8) images, we extract indexes values in 2 455 random points, separated more than 30 m each. During the studied period the area of the garden show a mean NDVI of 0.635, with extreme values from 0.417 to 0.805. Places of higher NDVI index values were Central-Cuban Semideciduous Forest, Pine Forest, Dry Forest and Eastern Cuban Semideciduous Forest. For EVI index higher values corresponded to Eastern Cuban Semideciduous Forest, Central America Zone, South America Zone and Africa Zone. In the last decade, NDVI median per zone vary from 0.808 in Mogote Zone up to 0.613 in Cultivated Plants Zone, and in EVI index, maximum values were at Coastal Shrub with 0.537. The patterns of variation differed between zones, according to tree cover presence or absence, which generally increased when moving away from the roads. The historical trend show a sustained increase in indexes values suggesting a positive evolution of the vegetation cover. The results obtained can contribute to the proper management of the Cuban National Botanic Garden collections.

Keywords: live plant collections, EVI, botanic gardens, NDVI, remote sensing

Citación: Felipe, F.L. & Denis, D. 2021. Variaciones espaciales y temporales de dos índices espectrales de vegetación en el Jardín Botánico Nacional de Cuba, durante 1984-2020. *Revista Jard. Bot. Nac. Univ. Habana* 42: 119-136.

Recibido: 9 de septiembre de 2020. **Aceptado:** 9 de noviembre de 2020. **Publicado en línea:** 10 de mayo de 2021. **Editor encargado:** Banessa Falcón-Hidalgo.

INTRODUCCIÓN

Un jardín botánico es una colección de plantas vivas clasificadas y ordenadas científicamente para uso público con propósitos educativos, científicos y recreativos, destinada fundamentalmente a generar y divulgar conocimientos sobre las plantas (Leiva 1980). Aunque la historia de los jardines botánicos cubanos data del siglo XVIII, los orígenes del Jardín Botánico Nacional de Cuba (JBN) en su localización actual se ubican a finales de la década del '60, con fecha de su fundación el 6 de enero del año 1968 por iniciativa del Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz (Leiva 1981).

Luego de 16 años de intensos trabajos para remodelar sus casi 600 ha originales, de innumerables expediciones para inventariar, localizar y transportar los ejemplares, y luego de sembrar y aclimatar más de 180 000 árboles y arbustos, y cerca de 4 000 taxones vegetales (Leiva 1988), el 24 de marzo de 1984 fue abierto al público. Ubicado entre los municipios Boyeros y Arroyo Naranjo, en la periferia de La Habana. Esta institución tiene una extensión de cerca de 500 ha que se destinan, en su mayor parte, a la exhibición de aproximadamente 3 000 especies de plantas (Camino & Montesinos 2015), en un ambiente seminatural y ordenadas

según un criterio fitogeográfico principal para el ordenamiento de sus colecciones (Leiva 1980).

El JBN está dividido en 26 zonas (colecciones de plantas al aire libre) con especies vegetales de Cuba y de las regiones tropicales del mundo, las cuales presentan características, composiciones vegetales y manejos diferentes. En seis zonas se cultivan y exponen plantas provenientes de las regiones tropicales de diferentes continentes (África, América Central y del Sur, Asia, Australia y Oceanía) y otras dos se enfocan en plantas de las Antillas y México. Un área abierta, con vegetación herbácea, contiene una amplia colección de palmas (*Palmetum*), que se encuentran entre las plantas más simbólicas de los trópicos y que incluye 55 géneros y 134 especies (Hernández 1985). En una zona denominada Bosque Arcaico se mantiene una colección especial de plantas de importancia evolutiva. Existe una amplia extensión con un diseño espacial particular, en la cual se presentan las especies vegetales ordenadas en forma de árbol filogenético (zona Sistemática) y en otra se exponen plantas ornamentales con fines ecológico-didácticos y de valor etnobotánico.

En nueve sub-zonas, dentro de la zona Fitogeográfica Cubana, se trata de representar el aspecto o forma de las comunidades vegetales más representativas del archipiélago de Cuba, se simula en la composición y distribución espacial de las respectivas flóculas, las fisonomías respectivas (Leiva 1975). Así, aparecen representados los Bosques Semicaducifolios (o semidecíduos) de las zonas central, occidental, y oriental de Cuba, la Manigua Costera, la Vegetación de Mogotes, el Monte Seco, el Pinar, la Sabana de Júcaros y Palmas y la Vegetación sobre Serpentina (llamada popularmente cuabal). Finalmente, hay una zona de Plantas cultivadas de interés económico y un Área Experimental. Algunas de estas colecciones de campo, como la de Vegetación sobre Serpentina o el *Palmetum*, destacan por constituir en sí mismas resultados paradigmáticos de los esfuerzos de conservación *ex situ* de especies endémicas amenazadas de la flora cubana, y tienen un alto valor patrimonial, reconocido por varios especialistas en este campo (Leiva 1988a).

El mantenimiento de estas extensas áreas de vegetación para lograr un estado adecuado de conservación requiere de un considerable esfuerzo de manejo y monitoreo (Lascurain & al. 2006). La vegetación puede variar su estado en dependencia de numerosos factores, como los patrones de precipitación o eventos meteorológicos extremos como las tormentas o huracanes (Walker 1991). En estado natural la vegetación desarrolla mecanismos ecológicos homeostáticos que garantizan su resistencia y resiliencia, pero en las condiciones particulares de un jardín botánico no siempre se logran reproducir estos estados (Pautasso & Parmentier 2007). En estos existe riesgo por la cercanía de las plantas y la inevitable dispersión que posibilita colonizar áreas dentro o fuera del propio jardín en las que, para mantener la vegetación que se pretende representar, no son deseables (Villate & al. 2016). También existe un riesgo potencial asociado a efectos antropogénicos debido a su ubicación cercana a urbes

altamente pobladas y por el impacto de los visitantes (Mack & Lonsdale 2001, Zalba & Nebbia 2006).

En las áreas del JBN se ofertan como productos turísticos visitas guiadas, caminatas, senderos interpretativos, *canopy* o tirolesa y otras alternativas vinculadas al turismo de naturaleza (<http://www.jardinbotanico.co.cu>), que, de no ser bien manejadas, pueden afectar a la vegetación en general o a determinadas especies. Asimismo, es posible una mayor susceptibilidad a invasiones biológicas y a plagas, o incluso consecuencias indeseables imprevistas de las propias acciones de manejo (Villate & al. 2016). Por estas razones, la búsqueda e implementación de métodos de monitoreo eficientes, económicos, sensibles y de respuesta rápida, resulta parte del trabajo esencial en este tipo de institución (Klijn 1994).

Los datos que se obtienen a partir de satélites multiespectrales se han probado como alternativas valiosas para la evaluación de las dinámicas de las coberturas vegetales y de los cambios en los usos del suelo (Gonzaga 2015). Estas imágenes brindan información espacial importante en forma de áreas, ubicaciones y distancias, pero también brinda información espectral, dada por las reflectancias diferenciales que cada elemento de la superficie tiene en distintas zonas del espectro electromagnético. El análisis de secuencias de imágenes en un mismo sitio aporta un elemento temporal, lo que facilita el monitoreo o la descripción de variaciones en intervalos desde pocos días (según la resolución temporal del satélite específico) hasta varias décadas (Sacristán 2006). Con las reflectancias de diferentes longitudes de onda se calculan una serie de índices que detectan o resaltan propiedades de la cobertura vegetal (Richards & Jia 2006).

Los índices espectrales de vegetación derivados de información satelital son, en la actualidad, una de las formas más efectivas de evaluar los cambios históricos en las propiedades de la cobertura vegetal (Turner & al. 2003, Fairbanks & McGwire 2004, Feeley & al. 2005, Yebra & Chuvieco 2008). Estos dos índices han sido empleados con frecuencia en estudios de seguimiento de efectos antropogénicos sobre los ecosistemas naturales (Pettorelli & al. 2012, Willis 2015, Gillespie & al. 2018) y han sido propuestos como Variables Esenciales de Biodiversidad (Pereira & al. 2013, Navarro & al. 2017, Jetz & al. 2019). Los índices de vegetación, de manera general, no son variables de carácter biológico, sino biofísico; ni están diseñados para cuantificar una característica en específico de la vegetación, en el sentido de las variables que se han tomado tradicionalmente en tierra. Sin embargo, han mostrado correlaciones significativas con factores tan importantes como el contenido de clorofila, la densidad del follaje, el índice de área foliar, la salud de la vegetación, el contenido de agua y muchos otros elementos que sustentan su uso como indicadores en la mapeación de tendencias relativas y en el monitoreo de cambios generales (Pereira & al. 2013).

Existen sistemas de monitoreo satelital que combinan estas herramientas para hacer seguimientos en tiempo real de las

condiciones de zonas naturales, como el sistema del MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) para la detección de incendios forestales o el *Global Forest Watch*, que monitorea el estado de zonas boscosas (<https://www.globalforestwatch.org>).

En Cuba son aún pocos los estudios que aprovechan las ventajas de las técnicas de percepción remota y los índices de vegetación para estudios de dinámica, comparaciones geográficas y evaluaciones de impactos sobre la vegetación (Cerdeira-Estrada & al. 2008, Morejón & al. 2010, Denis 2015, Hernández & Cruz 2016, Ponvert-Delisle 2016). Felipe (2018) evaluó la capacidad de los índices espectrales para la discriminación entre formaciones vegetales en Cuba y Denis & al. (2020) los emplearon para caracterizar las respuestas espectrales en manglares de La Habana. Otros dos estudios previos han evaluado el comportamiento del Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación (NDVI) a nivel nacional (Cobos & al. 2016, Cruz & al. 2020).

A partir de estos antecedentes, en el presente trabajo se propone el objetivo de caracterizar desde el punto de vista espectral, algunas de las propiedades de la cobertura vegetal en las distintas zonas del JBN y describir la variabilidad de esta respuesta espectral durante el período de 1984-2020. Esta información, aunque preliminar, puede ser utilizada como indicador de desempeño de la labor realizada en el desarrollo de las colecciones de campo. Por otra parte, conjuntamente con los mapas generados, pueden servir de apoyo a las medidas de manejo y control dentro de las áreas de esta institución.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló en las áreas del JBN, ubicado entre los 23,0969° lat. N y -82,2143655° long. W y los 22,58470447° lat. N y -82,191631° long. W. Para asegurar la precisión de los muestreos espaciales, el primer paso correspondió al montaje de un sistema de información geográfica en el programa *ArcGis v.10.5* (ESRI, Redlands, CA, USA), con mapas actualizados en formato vectorial. Dichos mapas fueron digitalizados de forma manual y se tomó como base una imagen del satélite *WorldView 2*, de muy alta resolución espacial (50 cm) con fecha de adquisición del 21 de mayo de 2019 (Figura 1), la cual se descargó del portal *World Imagery* y su escenario cubrió un área de 10 km². Las capas del sistema incluyeron los bordes exteriores del JBN, los límites aproximados de las zonas de estudio, las construcciones, los cuerpos de agua y el sistema de viales que permitieran filtrar o clasificar los puntos de muestreo.

Para el análisis se tuvieron en cuenta 26 zonas: 22 colecciones de campo, el Área Experimental, las áreas de uso administrativo o público y dos zonas remanentes que se agruparon bajo la denominación de áreas sin uso específico actual (en términos de la vegetación) (Figura 2), aunque en los mapas originales del JBN estaban asignados a otras zonas y pudieran contener elementos plantados de ellas, en especial la primera, ubicada más al norte y que contiene elementos de bosques semicaducifolios. Dentro de la zona

de Plantas Ornamentales están incluidas la Colección Ekman, la Colección Etnobotánica y la Ecológico-Didáctica, que no se individualizaron para el análisis por ser de poco valor para el objetivo científico del estudio, por su pequeña extensión y por el efecto de la reflexión del piso de concreto y muros de los canteros. Los mapas fueron validados con 10 puntos de control en tierra dispersos en toda el área, tomados con un GPS (modelo Garmin GPSMap62s, 3 m de precisión) que rindieron un error cuadrático medio de 3,4 m (± 1,4 m). Los nombres y límites de las áreas empleadas en el estudio, aunque se alinearon lo más posible a lo utilizado por la administración de esta institución, han sido modificados por los autores para ajustarlos al objetivo del estudio.

La información espectral provino de los satélites de la serie *LandSat (4/5/7/8)* (30 m de resolución espacial) entre los años 1984 y 2020. Para evitar la alta variabilidad típica de este tipo de información, que se maximiza en áreas relativamente pequeñas, se crearon composiciones de valores medios por cada década. De esta forma se obtuvieron cuatro escenarios por cada índice espectral: 1984-1990 (a partir de 49 imágenes), 1991-2000 (250 imágenes), 2001-2010 (72 imágenes) y 2011-2020 (164 imágenes). Los datos se extrajeron del *Google Earth Engine*, a través de la plataforma *Climate Engine* (<http://ClimateEngine.org>) (Huntington & al. 2017).

Para garantizar una adecuada inferencia, según un diseño de efectos aleatorios, en lugar de tomar toda la información de las imágenes se hizo un muestreo estadístico a partir de 2 455 puntos aleatorios, distanciados más de 30 m entre ellos, dentro de la extensión del JBN (Figura 3). Los puntos fueron clasificados en relación con la zona a la que pertenecían y al tipo de cobertura sobre el cual se encontraba (con dos categorías: zona arbolada (n = 990) o no arbolada (n = 1 461), determinada visualmente sobre la imagen de alta resolución. Al obtenerse aleatoriamente, el tamaño de muestra para cada zona estuvo relacionado con su extensión (Tabla I). Se calculó la distancia al vial más cercano, se tuvo en cuenta que las carreteras pueden influir, tanto en la respuesta espectral del píxel como en las propiedades de la vegetación. Para controlar el efecto sobre la reflectancia del píxel se marcaron como de carácter dudoso aquellos puntos que se encontraban a menos de 30 m de algún vial, construcción o cuerpo de agua (n = 1 014) y se repitieron los análisis con y sin ellos, sin obtenerse diferencias significativas.

Como variable primaria de respuesta se extrajeron los valores de dos índices espectrales de vegetación: el Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) y el Índice de Vegetación Mejorado (EVI). El NDVI (Rouse & al. 1974) es el índice espectral más conocido y ampliamente utilizado para la descripción de la salud y otros parámetros de la vegetación (Fairbanks & McGwire 2004, Tun-Dzul & al. 2008, Pettorelli 2013). Su fórmula normaliza la diferencia entre las regiones de mayor reflectancia y absorción de la clorofila, que son el rojo y el infrarrojo cercano (Cruz & al. 2020): $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$,

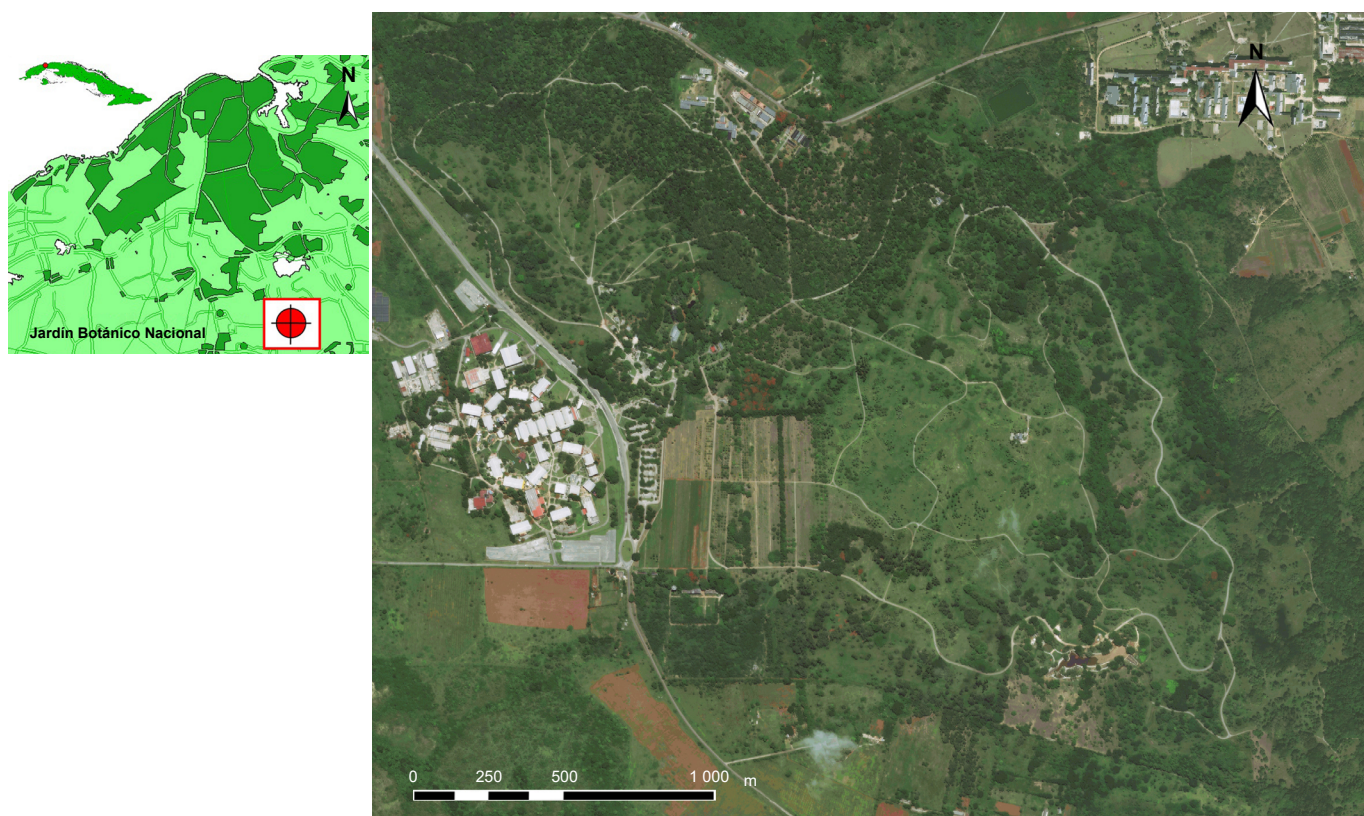


Fig. 1. Jardín Botánico Nacional de Cuba, vista general del escenario de la imagen satelital de base empleada para la digitalización de sus mapas actualizados (WorldView 2, 21.VI.2019), como base para su caracterización espectral con índices de vegetación.

Fig. 1. National Botanical Garden of Cuba, overall view of the satellite imagery scenario used to digitalize updated maps (WorldView 2, 2019.VI.21), as baseline for its spectral characterization with vegetation indexes.

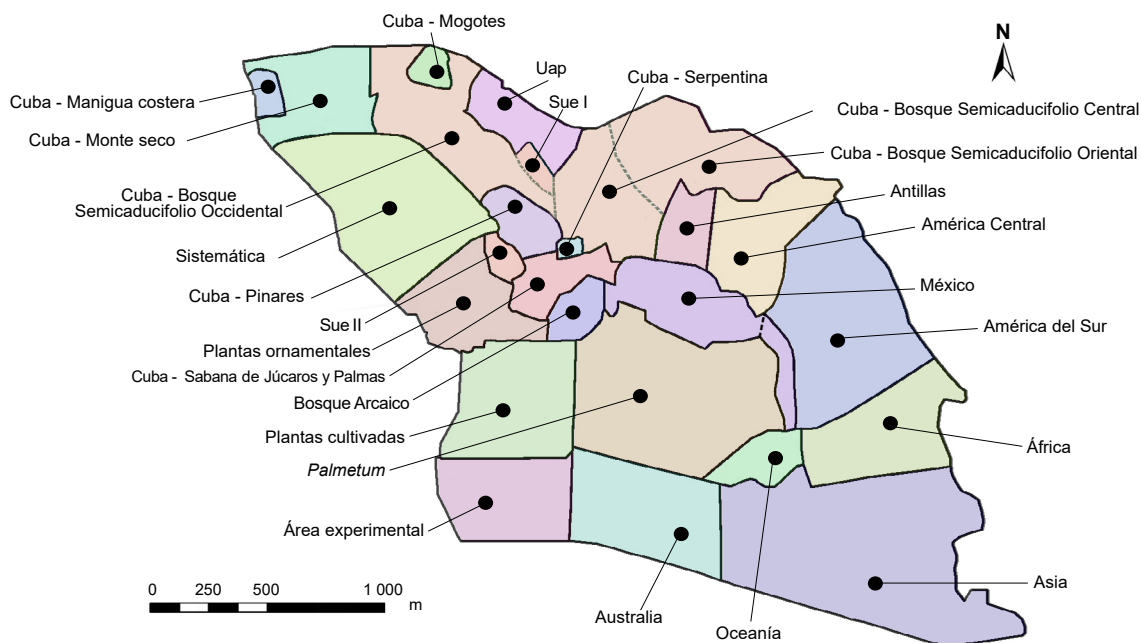


Fig. 2. Distribución de las zonas consideradas en este estudio en el Jardín Botánico Nacional de Cuba para la caracterización espectral a través de índices de vegetación. Sue: áreas de uso no específico, con vegetación. Uap: áreas de uso administrativo y público.

Fig. 2. Distribution of vegetation zones considered in this study in the National Botanical Garden of Cuba for spectral characterization through vegetation indexes. Sue: areas of nonspecific vegetation use. Uap: areas of administrative or public use.

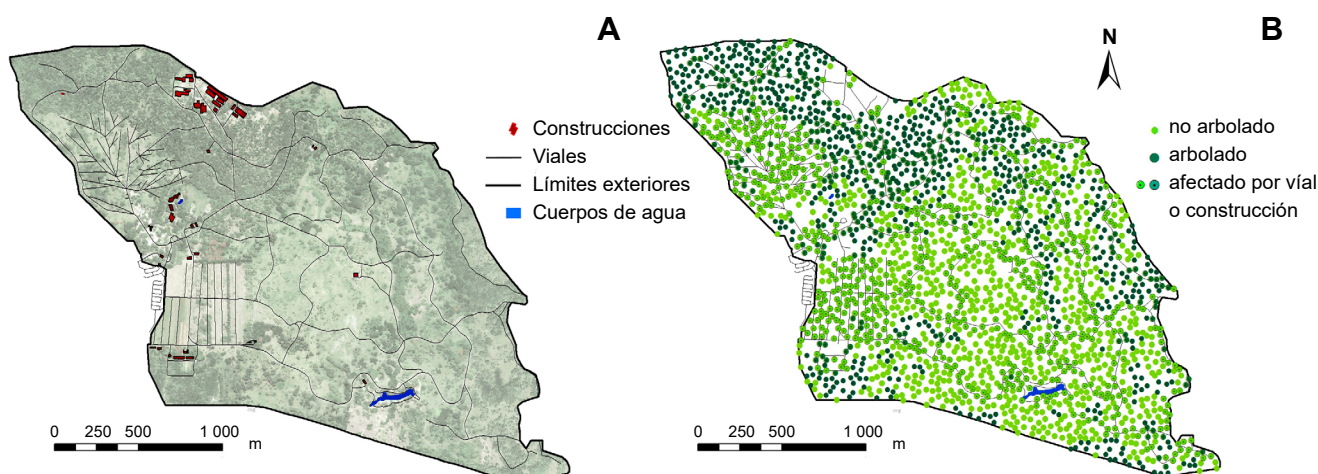


Fig. 3. Mapa del Jardín Botánico Nacional de Cuba con la distribución de la red de viales, construcciones y cuerpos de agua (A) y de los puntos de muestreo de los índices espectrales de vegetación (NDVI y EVI), durante 1984-2020, y su clasificación en relación a los viales y construcciones (B).
Fig. 3. Map of the National Botanic Garden of Cuba with the road networks, buildings and watercourses distribution, and the sampling points to obtain the spectral vegetation indexes (NDVI and EVI) with its classifications relatives to the road networks and buildings during 1984-2020 (B).

dónde: NIR es la banda de reflectancia en el infrarrojo cercano (0,772-0,898 μm) y Red la banda de reflectancia en la zona roja del espectro (0,630-0,690 μm) (valores del sensor ETM+, hay ligeras variaciones en los rangos exactos entre las generaciones de satélites).

Los valores del NDVI varían de -1 a 1, pero el rango común para la vegetación se encuentra entre 0,2 y 0,8. Los valores negativos corresponden al agua y en el suelo desnudo o concreto tiende a valores cercanos a cero (Neigh & al. 2008). Este índice, al representar la actividad fotosintética, está asociado con la biomasa, la productividad primaria neta, el secuestro de carbono, el estrés hídrico de la vegetación y la biodiversidad de los ecosistemas (Nagendra & al. 2013, Pereira & al. 2013). A escala regional y global se ha asociado con las variables del clima, particularmente las precipitaciones (Del Grosso & al. 2008, Hermance & al. 2015).

El NDVI, sin embargo, tiende a saturarse frente a valores muy altos de cobertura vegetal, como es el caso de muchos bosques tropicales y por ello los valores superiores a 0,8 reflejan pobremente las variaciones en la vegetación. Por ello fue desarrollado posteriormente el EVI, que es una variante mejorada, con mayor sensibilidad en estas situaciones, y que incorpora la banda del azul para corregirlos efectos del suelo: $EVI = 2,5 * (NIR - Red) / (NIR + 6 * Red - 7,5 * Blue + 1)$, donde Blue es la banda de reflectancia en la zona azul del espectro (0,441-0,514 μm) y Red la banda de reflectancia en la zona roja del espectro (0,630-0,690 μm).

En cada punto de muestreo se tomaron los valores promedios y los máximos de estos índices por cada etapa considerada (cada una de las cuatro décadas). Como medida de variabilidad se calculó el coeficiente de variación entre los períodos y como indicador de tendencia global, se calculó la pendiente media de la recta de mejor ajuste entre estos cuatro valores.

Los resultados fueron descritos estadísticamente por las tendencias centrales y variabilidades, globalmente y por cada zona del JBN estudiada. Se emplearon estadísticos no paramétricos, tanto para la descripción (mediana, cuartiles y percentiles) como para las comparaciones (pruebas U de Mann-Whitney y de Kruskal-Wallis), dada la gran variabilidad de estos datos, su distribución asimétrica y el fuerte efecto de sesgo potencial que los tamaños de muestra tan elevados tienen sobre los estadísticos y probabilidades obtenidos bajo la asunción de distribución normal (aunque se brindan las medias con propósitos comparativos con la literatura). Se correlacionaron los valores de los índices, entre ellos y con la distancia a los viales.

Fueron identificadas las áreas de mayor estabilidad y variabilidad histórica en estos indicadores a través de una escala cualitativa de cuatro niveles: Casi nulos (NDVI: 0,20-0,40; EVI: 0,06-0,15), Bajos (NDVI: 0,40-0,50; EVI: 0,16-0,30), Medios (NDVI: 0,50-0,60; EVI: 0,31-0,40) y Altos (NDVI: 0,60-0,85; EVI: 0,41-0,65). Se confeccionó un mapa de tendencias, que brinda información sobre la disminución o el aumento histórico en estos indicadores en las zonas. Todos los mapas producidos en este estudio, así como los datos primarios, se encuentran libremente disponibles en el repositorio Figshare (<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.12897035>) para que puedan ser utilizados con fines de manejo, uso administrativo, planificación espacial e investigaciones posteriores en las áreas del JBN.

RESULTADOS

A partir de la mapeación realizada durante la presente investigación se corroboró la extensión del JBN que es exactamente de 471,4 ha. Durante todo el período de estudio, el área del JBN tuvo un índice NDVI promedio de 0,635; con valores extremos entre 0,417 y 0,805. A nivel de zonas, los mayores valores medios globales de NDVI (se tuvo en cuenta todo el período de estudio de 1984 a 2020) estuvieron en la

TABLA I

Características espaciales de cada zona de vegetación del Jardín Botánico Nacional de Cuba y número de puntos de muestreo tomados para caracterizar su respuesta espectral con dos índices de vegetación tomados por sensores remotos

Los datos fueron obtenidos de la digitalización manual de las áreas, sobre una imagen satelital de alta resolución de referencia.

TABLE I

Spatial characteristic of each vegetation zone of the National Botanical Garden of Cuba and number of sampled points used to describe its spectral response with two spectral vegetation indexes by remote sensing

Data was obtained from manual digitalization over high resolution satellite imagery as reference.

Nombre de la zona	Coordenadas del punto central		Área (ha)	Número de puntos muestreados	
	Long. W	Lat. N		(Arbolados/ no arbolados)	Total
América Central	-82,32870°	22,99498°	18,5	(44/48)	92
América del Sur	-82,32597°	22,99115°	39,4	(66/118)	184
África	-82,32228°	22,98725°	21,2	(38/69)	107
Antillas	-82,33317°	22,99480°	6,7	(10/20)	30
Asia	-82,32442°	22,98300°	64,9	(63/260)	323
Australia	-82,33479°	22,98521°	25,3	(15/105)	120
Bosque Arcaico	-82,33655°	22,99241°	4,9	(7/20)	27
México	-82,33278°	22,99208°	19,6	(28/65)	93
Oceanía	-82,32710°	22,98667°	6,6	(4/28)	32
Plantas Ornamentales	-82,34227°	22,99310°	16,5	(36/27)	63
<i>Palmetum</i>	-82,33268°	22,98898°	47,3	(17/213)	230
Sistemática	-82,34519°	22,99667°	37,1	(30/142)	172
Sub-Zonas de vegetación cubana					
Bosque Semicaducifolio Central	-82,33628°	22,99650°	17,1	(87/9)	96
Bosque Semicaducifolio Occidental	-82,34308°	22,99957°	23,0	(122/10)	132
Bosque Semicaducifolio Oriental	-82,33263°	22,99854°	22,6	(65/53)	118
Manigua Costera	-82,34944°	23,00071°	2,3	(12/0)	12
Mogotes	-82,34313°	23,00161°	2,5	(13/0)	13
Monte Seco	-82,34719°	23,00125°	16,3	(84/1)	85
Pinares	-82,33988°	22,99653°	6,4	(33/5)	38
Vegetación sobre Serpentina	-82,33754°	22,99498°	0,8	(5/0)	5
Sabana de Júcaros y Palmas	-82,33822°	22,99351°	7,8	(25/18)	43
Área de cultivos	-82,33969°	22,98958°	25,3	(6/116)	122
Área Experimental	-82,34021°	22,98525°	19,4	(47/41)	88
Áreas sin uso específico I	-82,33899°	22,99807°	2,4	(3/10)	13
Áreas sin uso específico II	-82,34018°	22,99451°	1,8	(8/0)	8
Áreas de uso administrativo o público	-82,33967°	22,99986°	9,5	(7/8)	15

Zona de Vegetación Cubana, específicamente en el Bosque Semicaducifolio Central, los Pinares, el Monte Seco y al área de Bosque Semicaducifolio Oriental (Figura 4A). Las zonas de mayores promedios globales de EVI fueron el Bosque Semicaducifolio Oriental, las zonas de América Central, América del Sur y África (Figura 4B). En ambos índices, la variabilidad media fue del 8 %, pero en algunos lugares el NDVI llegó a variar hasta 31 % y el EVI hasta 43 % en reflejo de la heterogeneidad espacial y de los cambios temporales. Los valores de EVI variaron entre 0,26 y 0,60; con un promedio de 0,42.

Si se consideran para el análisis espacial solamente los índices de la última década, la mediana del NDVI por zonas osciló entre 0,719 en la zona de Mogote hasta 0,566 en la zona de Vegetación sobre Serpentina (Figura 4C). En el caso del EVI los extremos de las medianas estuvieron en la zona de Vegetación sobre Serpentina (0,343), seguida del área de Plantas cultivadas (0,376) y en Mogotes (0,468) y la Manigua Costera (0,448), así como en una de las áreas sin uso específico (0,452) (Figura 4D). En la zona de Asia se encontraron los extremos absolutos en este índice (0,263 y 0,605).

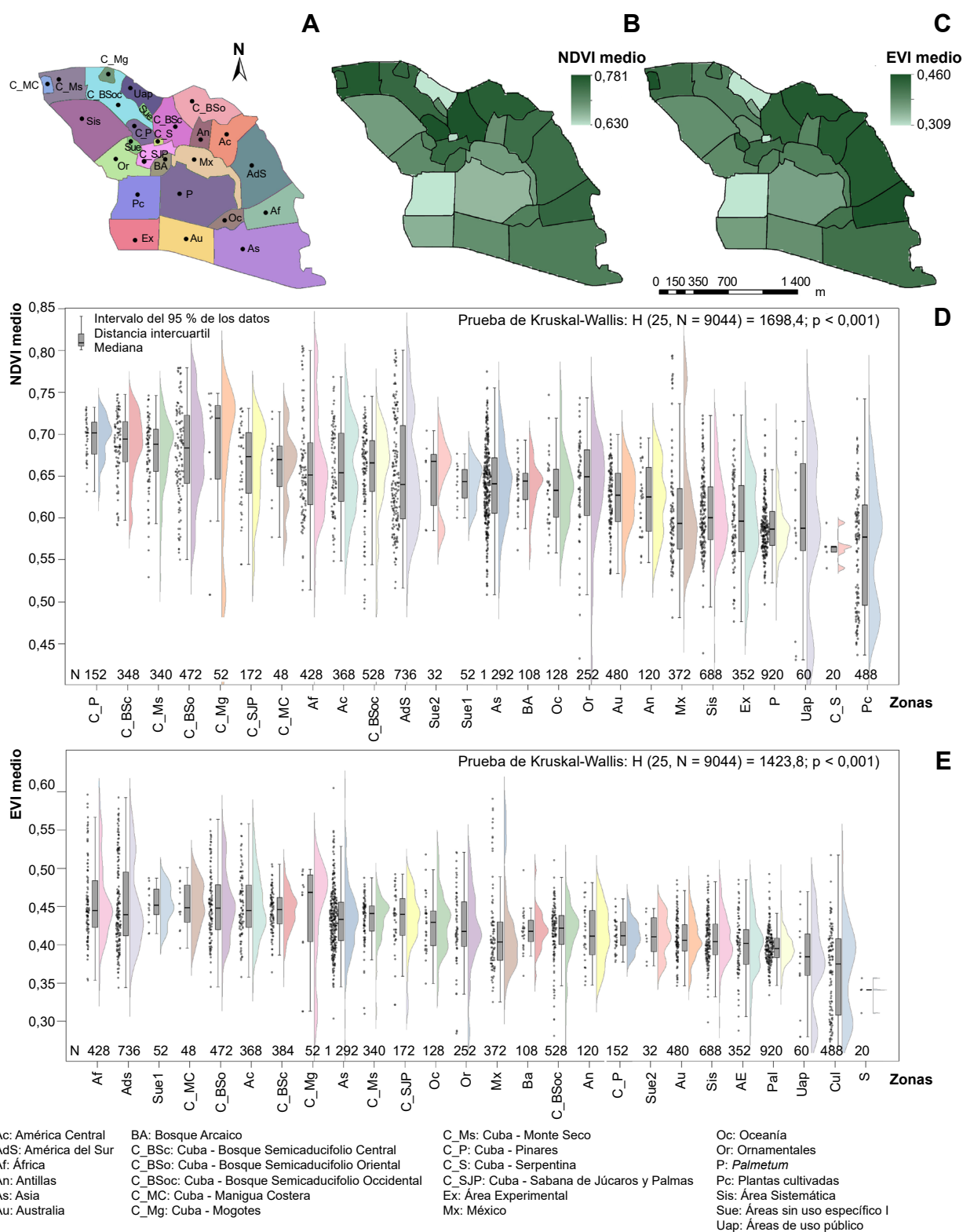


Fig. 4. Comparación de los valores centrales y distribuciones de los índices NDVI y EVI en las distintas áreas del Jardín Botánico Nacional de Cuba. Se incluye como referencia el croquis con la ubicación de las áreas según su vegetación (A) y se presentan los mapas con los valores zonales medios de NDVI (B) y EVI (C) entre 1984 y 2020, así como las distribuciones estadísticas de los valores actuales (última década) entre zonas para el NDVI medio (D) y para el EVI medio (E).

Fig. 4. Comparison of central values and sampling distribution of NDVI and EVI spectral indexes in different vegetation zones of the National Botanical Garden of Cuba. Sketch with vegetation zones location was included, as reference (A) and map of mean zonal values of NDVI (B) and EVI (C) considering the whole study period from 1984 to 2020, as well as the statistical distribution of current NDVI mean values (last decade) (D) and EVI mean values per zone (E).

El mayor rango de variación (rango intercuartiles) del NDVI en las áreas que reproducen zonas naturales continentales correspondió a África, América Central y América del Sur, aunque fueron superados por la variabilidad de algunas zonas fitogeográficas cubanas como la Manigua Costera, la de Vegetación sobre Serpentina y Mogotes, por las áreas de uso público o administrativo y la de Plantas Ornamentales. El índice EVI tuvo un comportamiento más preciso, menos disperso que el NDVI, y en este el mayor rango de variación apareció en la zona representativa de la vegetación natural de África, América del Sur y Mogotes, mientras que los menores rangos fueron de las zonas de Vegetación sobre Serpentina, el *Palmetum* y Pinares.

Destaca también la amplia variabilidad del NDVI en las áreas más asociadas a usos antrópicos (para el NDVI fueron Plantas Ornamentales, Área Experimental y las áreas de uso público; [Figura 4D]), aunque para el EVI la zona de Asia fue la de mayor rango (Figura 4E). En el Área de cultivos destaca la distribución marcadamente bimodal de los índices, probablemente por la marcada combinación de partes arboladas y descubiertas. Esto también se observa, pero más ligeramente, para el NDVI en las áreas de América del Sur y América Central. Los Pinares y una de las áreas sin uso específico mostraron los menores rangos de variación, tanto en NDVI como en EVI. De forma general, las tendencias centrales tuvieron diferencias estadísticas entre las zonas, dadas por las pruebas de Kruskal Wallis en ambos índices (Figura 4D-E).

Los dos índices espectrales empleados tienen una fuerte correlación entre ellos (Figura 5A), pero mantienen diferencias menores en sus estimados puntuales que justifican su uso combinado sin redundancia. Por esta razón, las áreas de distintas vegetaciones pueden diferir en sus variabilidades asociadas a cada índice (Figura 5B). Por ejemplo, la zona de vegetación de Asia tiene un coeficiente de variación del NDVI de 8,3 % y de EVI de 10 %, mientras que en un área sin vegetación específica fue de solo 4 % y 6 %, respectivamente. Las mayores dispersiones, indicadas por los coeficientes de variación, ascendieron a valores superiores al 13 % en el caso de EVI, en la vegetación de Mogote, en la zona de México y en la de Plantas Ornamentales, mientras que superó el 12 % para el índice NDVI también en Mogotes y en las áreas de uso público o administrativo.

A pesar de existir distintas variabilidades, hay zonas que tienen los mismos valores centrales de respuesta espectral en ambos índices, tales como América Central y África, o México y el Área Experimental (Figura 5C). También hay zonas que pueden coincidir en la respuesta en uno de los índices, no así en el otro, o diferenciarse en ambos a la vez (Figura 5D), lo que evidencia la multifactorialidad de elementos que determinan uno u otro índice.

Ambos índices espectrales mostraron diferencias significativas en relación con sus valores medios en puntos con cobertura arbórea que en puntos sin ella (Figura 6A, 6C). Las diferencias en valores absolutos fueron más marcadas en el NDVI.

Aunque con alta dispersión, la tendencia general también fue consistente con que el valor de ambos índices se incrementara con la distancia a los viales (Figura 6B, 6D).

De forma general, al analizar las tendencias históricas en todo el período de estudio se observa que la mayor parte del área del JBN está compuesta por regiones con altos valores de estos índices de vegetación (Figura 7). La región occidental del Área de cultivos y el área de uso administrativo y público, donde se encuentra una parte significativa de las construcciones, fueron predeciblemente, las de menores valores en general. En el NDVI resaltaron como áreas de alta variabilidad el Área Experimental, la Manigua Costera, el área de Vegetación sobre Serpentina y la parte oeste de la zona de Área de cultivos, así como algunos puntos de las áreas de uso administrativo.

Para el NDVI, el 66 % del área del JBN corresponde con valores medios del índice (entre 0,40 y 0,60) y un 29 % con valores elevados (mayores de 0,6). En el caso de EVI, una mayor proporción de área corresponde a zonas de niveles medios o bajos (93,3 %), y solo un núcleo de cerca del 6 % tiene niveles máximos. El EVI, como índice espectral, es más sensible y por ello detecta mayores niveles de variabilidad. Los mapas de cambios históricos (Figura 8A, 8C) muestran como las áreas con valores elevados de ambos índices espectrales se han incrementado de manera sostenida con los años, desde la apertura del JBN.

Los cambios más fuertes se detectaron en el NDVI (Figura 8B), cuyos valores cambiaron a las clases máximas en prácticamente todas las zonas de vegetación, y se mantuvo en la última década con categorías medias o bajas, solo en regiones dentro de las áreas de uso administrativo, la zona Sistemática, el Área de cultivos, el *Palmetum* y, en una proporción mucho menor, en las zonas de vegetación de Australia, Asia y México. El EVI también mostró una tendencia al incremento, pero menos marcada en la clase de valor superior (Figura 8D). De forma general, las áreas con valores elevados de NDVI aumentaron desde un 42,7 % en la década de 1980 hasta más del 91 % en la actualidad. El resto de las clases disminuyó proporcionalmente.

En el caso del EVI, el porcentaje de áreas del JBN con valores máximos aumentó desde menos del 1 % en la década de 1984 hasta casi el 15 % actualmente, siendo mucho más marcado el incremento en las áreas con valores medios (de un 48,5 % al 77,8 %) (Figura 8D). Al inicio del período de estudio, la mitad del área del JBN se caracterizaba por valores bajos de EVI, y esta área se redujo hasta un 12 % en la actualidad. No todas las zonas de vegetación han tenido la misma proporción de cambio, por ejemplo, la zona de Plantas Ornamentales, aunque aumentó en la primera década, luego se ha mantenido relativamente estable en sus valores de índices.

Cuando se analizan las tendencias de cambio en los índices espectrales, desglosadas por zonas (Tabla II), se observa que las mayores tasas de incremento en ambos indicadores

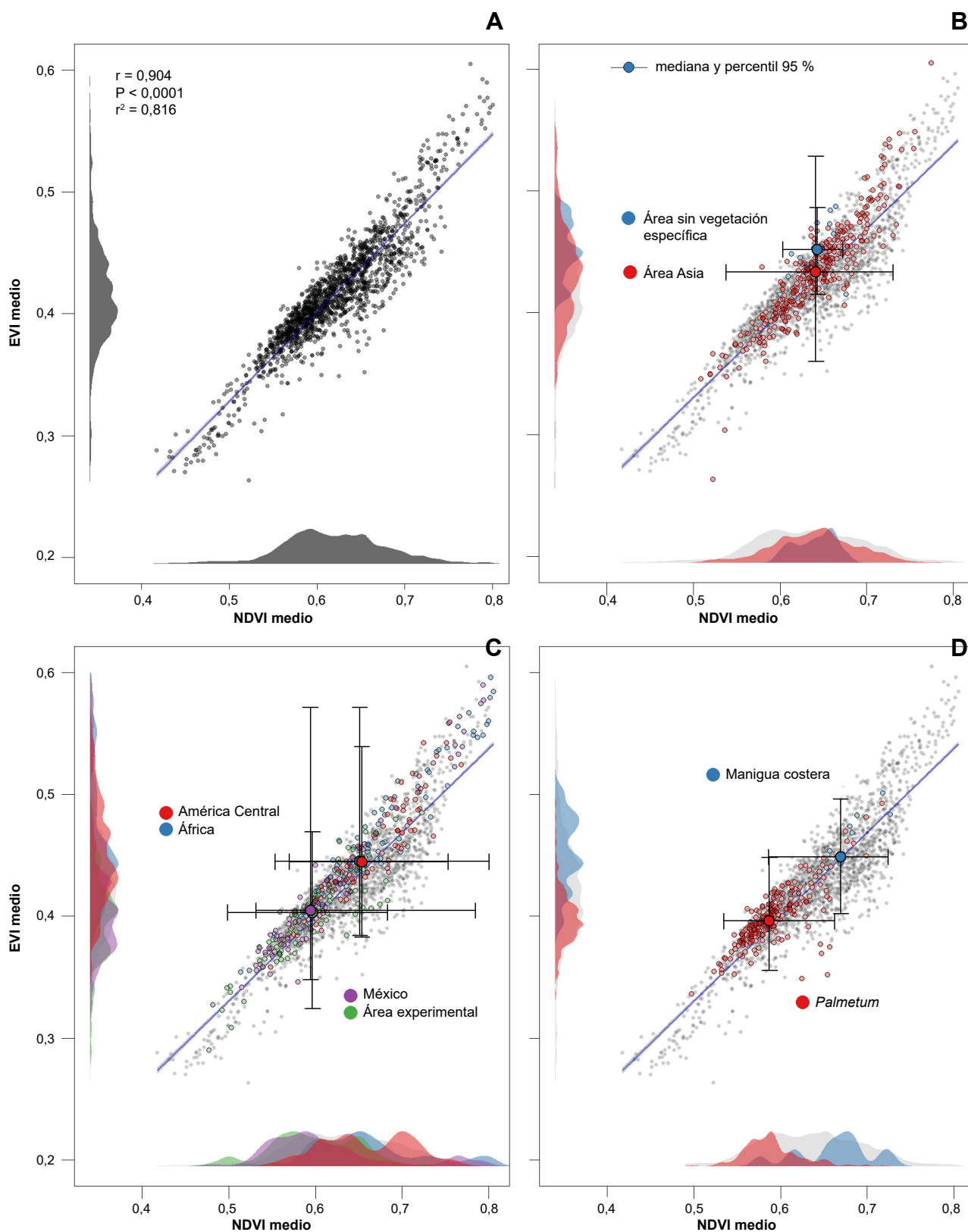


Fig. 5. Relación entre los valores medios de NDVI y EVI en las distintas áreas del Jardín Botánico Nacional de Cuba durante 2010-2020.

Fig. 5. Relationship among mean NDVI and EVI values in different vegetation areas of the National Botanic Garden of Cuba during 2010-2020.

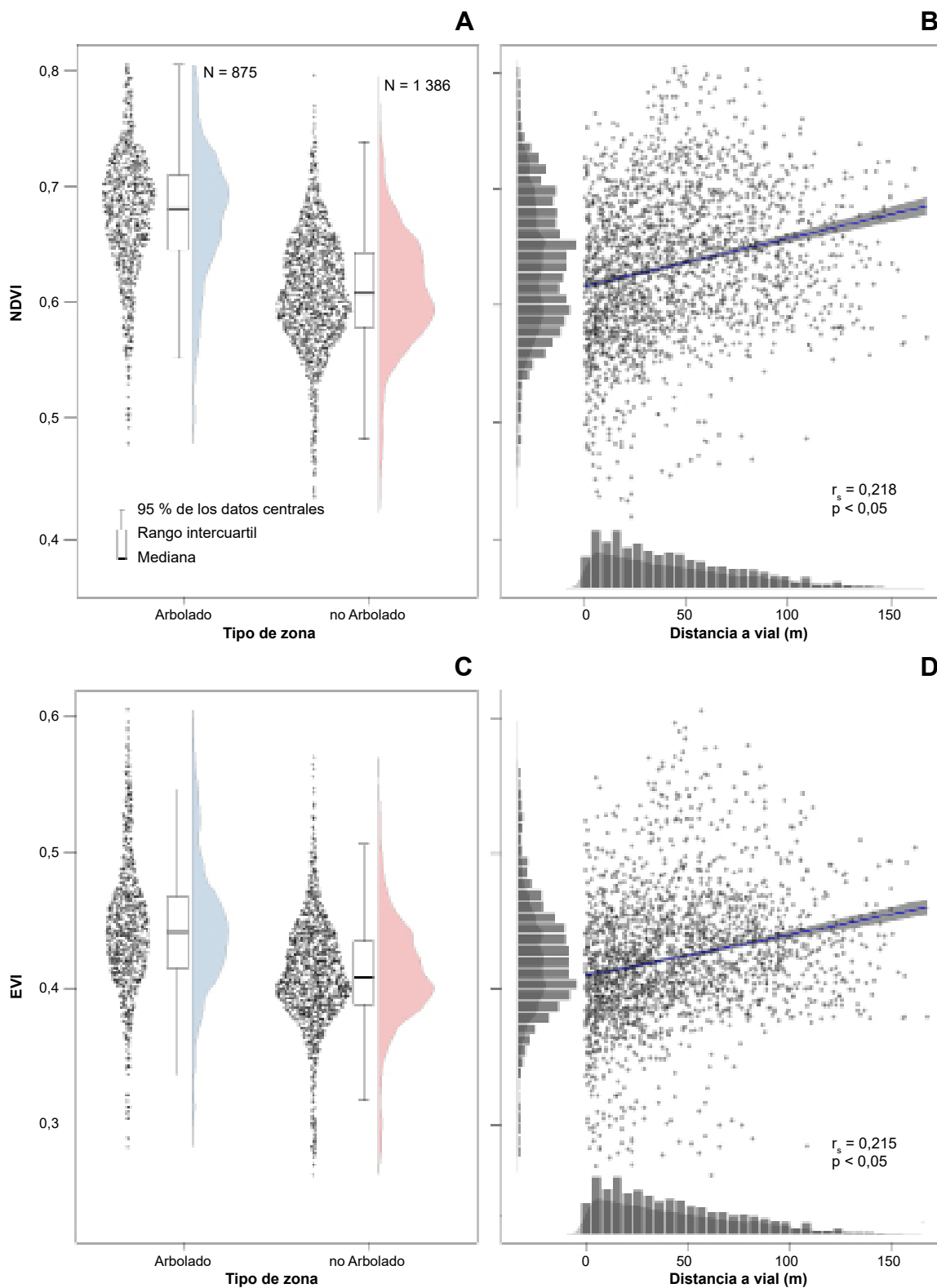


Fig. 6. Efectos sobre los valores medios de los índices espectrales, del tipo de zona (A: NDVI, C: EVI) y la distancia a carreteras y viales (B: NDVI, D: EVI) durante 2010-2020, en las distintas áreas del Jardín Botánico Nacional de Cuba.

Fig. 6. Effect on spectral indexes of tree cover (A: NDVI, C: EVI) and distances to roads (B: NDVI, D: EVI) in the National Botanic Garden of Cuba, during 2010-2020.

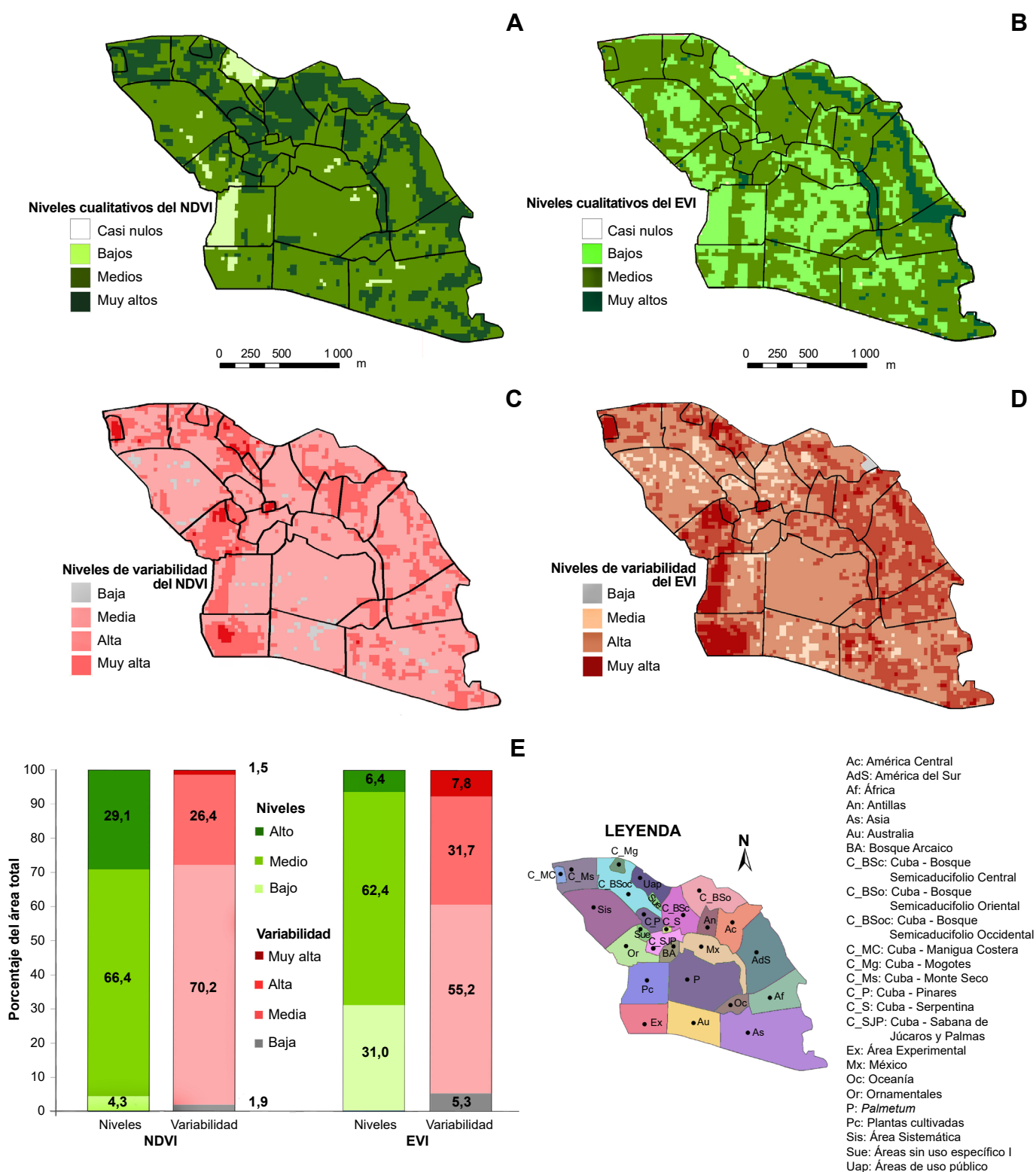


Fig. 7. Clasificación de las áreas del Jardín Botánico Nacional de Cuba en relación a niveles cualitativos de los índices espectrales de vegetación NDVI (A) y EVI medios (B), sus mapas de variabilidad dados por la desviación estándar del NDVI (C) y EVI (D), así como los porcentajes de las coberturas (E) durante 1984-2020.

Fig. 7. Classification of areas of the National Botanical Garden of Cuba in relation to qualitative levels of the spectral indexes of vegetation NDVI (A) and EVI means (B), and their variability maps given by the standard deviation of the NDVI (C) and EVI (D) during 1984-2020, as well as the percentages of coverage (E) during 1984-2020.

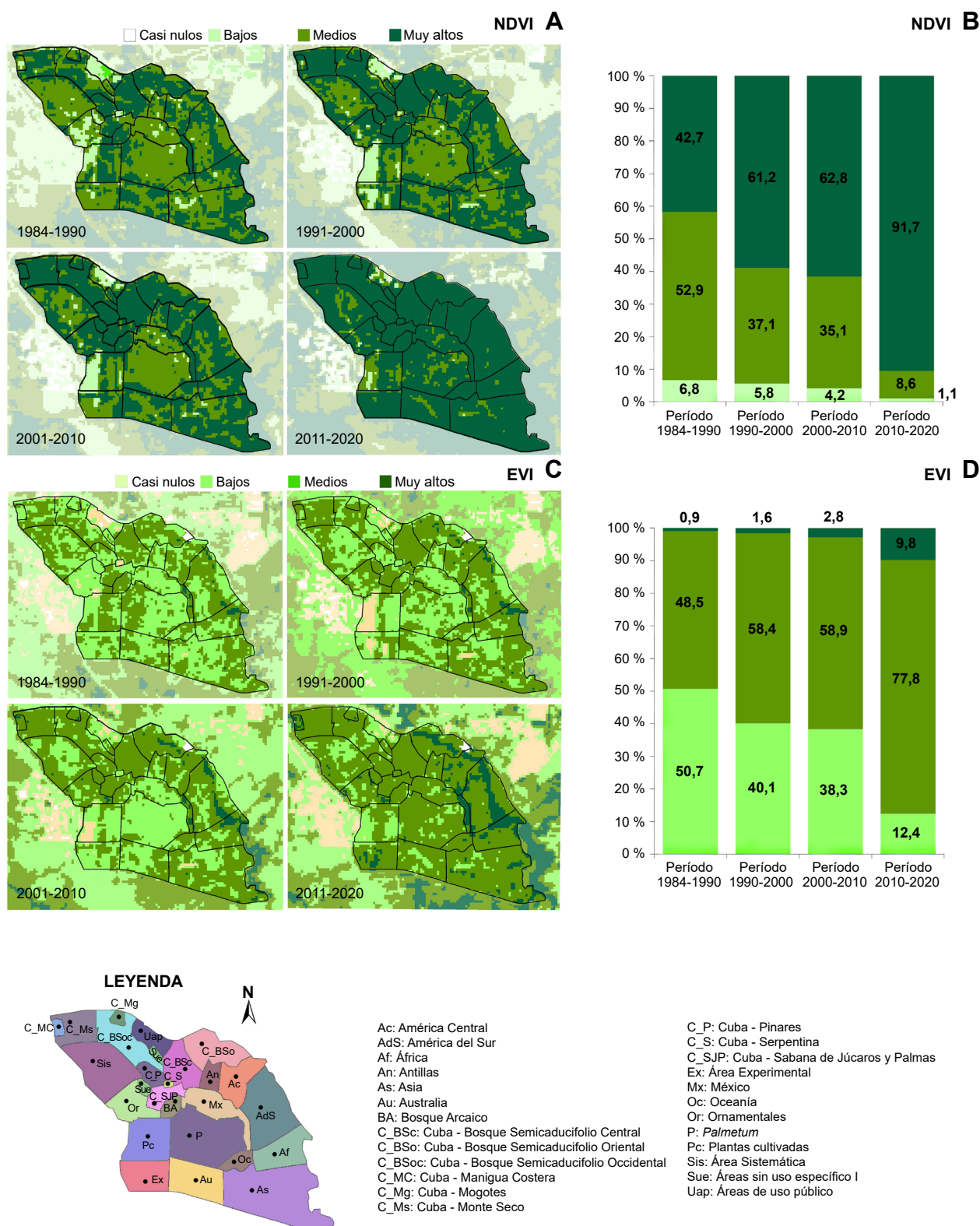


Fig. 8. Variaciones históricas de los índices espectrales de vegetación NDVI (A) y EVI (B) en el Jardín Botánico Nacional de Cuba, y magnitud de las variaciones de áreas con cada nivel de los índices NDVI (C) y EVI (D) durante 1984-2020.

Fig. 8. Maps of historical variation of spectral vegetation indexes NDVI (A) and EVI (B) levels in the National Botanical Garden of Cuba and magnitude of variations in area of each spectral vegetation indexes levels: NDVI (C) and EVI (D) during 1984-2020.

TABLA II

Indicadores de la tendencia histórica en los valores de los índices de vegetación NDVI y EVI en las diferentes zonas del Jardín Botánico Nacional de Cuba

La variabilidad se indica por la desviación estándar de las medias por década y la tendencia por la pendiente de los valores medios.

TABLE II

Indicator of historical trends in spectral indexes values (NDVI and EVI) in each vegetation areas of the National Botanical Garden of Cuba

Variability is suggested by standard deviation of decade means and trend by the slope of mean values.

Zona	NDVI		EVI	
	Variabilidad	Tendencia	Variabilidad	Tendencia
América Centra	0,058	0,043	0,043	0,03
América del Sur	0,056	0,039	0,043	0,029
África	0,054	0,039	0,041	0,027
Antillas	0,053	0,036	0,037	0,025
Asia	0,052	0,033	0,038	0,023
Australia	0,034	0,019	0,019	0,009
México	0,043	0,027	0,032	0,019
Oceanía	0,05	0,032	0,034	0,022
Bosque Arcaico	0,046	0,031	0,019	0,007
<i>Palmetum</i>	0,034	0,017	0,025	0,009
Sistemática	0,04	0,026	0,022	0,008
Plantas Ornamentales	0,094	0,066	0,064	0,041
Área de cultivos	0,045	0,015	0,037	0,005
Área Experimental	0,082	0,05	0,073	0,041
Bosque Semicaducifolio Central	0,045	0,031	0,02	0,012
Bosque Semicaducifolio Oriental	0,052	0,036	0,032	0,022
Bosque Semicaducifolio Occidental	0,054	0,04	0,021	0,009
Manigua Costera	0,102	0,079	0,063	0,048
Mogotes	0,072	0,054	0,046	0,032
Monte Seco	0,061	0,044	0,027	0,018
Pinares	0,055	0,04	0,022	0,012
Vegetación sobre Serpentina	0,132	0,102	0,076	0,057
Sabana de Júcaros y Palmas	0,043	0,032	0,015	0,009
Áreas sin uso específico	0,092	0,065	0,069	0,049
Áreas de uso administrativo o público	0,071	0,052	0,036	0,025

se encontraron en las zonas de Vegetación sobre Serpentina y de Manigua Costera. En el NDVI estas dos zonas también mostraron las mayores variabilidades históricas, seguidas de la zona de Plantas Ornamentales. En el caso de EVI, también destacaron por su variabilidad histórica el Área Experimental y la zona de vegetación sin uso específico, con tendencia también a un incremento relativamente rápido. Las zonas de vegetación de Australia, el *Palmetum* y la de Plantas Cultivadas, por otra parte, mostraron poca variabilidad y solo una ligera tendencia al aumento en los valores de NDVI. En los valores de EVI, a este grupo de áreas de alta estabilidad se adicionaron también el Bosque Arcaico y la zona Sistemática.

DISCUSIÓN

Los valores medios de NDVI obtenidos para el área del JBN estuvieron en el intervalo dado por Cruz & al. (2020) para las zonas naturales cubanas con imágenes *Landsat* del año 2017, que fue de 0,787, con un coeficiente de variación del 21 %. De cualquier forma, debe tenerse mucho cuidado al compararse los índices espectrales de vegetación entre estudios, ya que existen diferencias metodológicas que pueden influir marcadamente en sus valores (diferencias entre satélites, en las funciones de respuesta en las bandas espectrales, los métodos de calibración empleados, entre otros) (Steven & al. 2003, Detsch & al. 2016).

Aunque el promedio de la variabilidad del NDVI en las zonas del JBN fue relativamente baja, en algunos lugares superó la media nacional registrada por Cruz & *al.* (2020) (21 %), posiblemente por integrar variación espacial y temporal. La alta variabilidad de algunas zonas puede estar asociada con cambios relacionados a acciones de manejo o a los ciclos y prácticas de cultivo, como es el caso del Área de cultivos, cuya porción occidental se utiliza para plantas de ciclo corto. No obstante, debe tenerse en cuenta que mucha de esta variabilidad queda reducida pues se utilizaron escenarios medios de un período de una década. En estudios de menor resolución temporal, esta área debería ser subdividida según el tipo de cultivo al cual se dedique. El aumento en los valores de los índices en la zona de Plantas Ornamentales puede asociarse a los esfuerzos por embellecer las áreas de entrada al JBN.

Muchas de las zonas del JBN mostraron similares valores en estos índices, a pesar de las diferencias fisionómicas y florísticas, lo cual refleja que, con propósitos de discriminación, utilizar solo estos dos indicadores espectrales no es suficiente, en concordancia con lo planteado por Felipe (2018). Muchos factores biogeofísicos que pueden influir deben ser considerados, a través de otros indicadores obtenibles por sensores remotos, para lograr esta diferenciación.

El incremento histórico en los valores medios de los índices y en las proporciones de área en las categorías media y alta pueden ser indicadores del incremento en la cobertura vegetal, que se asocia a un aumento en la biomasa fotosintética, pero también describen una tendencia funcional positiva a nivel ecosistémico. El hecho de que incluso áreas con baja cobertura arbórea, como la zona del *Palmetum*, han experimentado incrementos notables en los índices espectrales, sugiere que no es únicamente un cambio en la cobertura arbórea el que promueve el aumento en los índices. A nivel de país, Cruz & *al.* (2020) detectaron también un incremento global del NDVI en las últimas décadas, que fue explicado por las estrategias conservacionistas, las prácticas amigables en el uso del suelo y la recuperación de las zonas boscosas (Goulart & *al.* 2018).

El incremento histórico en los valores de los índices espectrales es consistente con el señalamiento de Mugica & Acosta (2020) sobre el incremento en la riqueza de aves de la localidad, posiblemente producto de una oferta de recursos, que pueden ser tróficos o estructurales, incrementada en el tiempo. Se ha detectado una fuerte correlación entre el NDVI y la producción primaria neta, y por ello se ha empleado como una medida de productividad o de energía, en reflejo de la cantidad de recursos disponibles para consumidores (Boelman & *al.* 2003, Kerr & Ostrovsky 2003, Evans & *al.* 2005). La vía de relación más conocida que vincula la energía de la producción primaria con la riqueza de especies es la hipótesis de "más energía - más individuos" ("*More Individual Hypothesis*" - MIH) enunciada por Wright (1983). La hipótesis sugiere que, en áreas con mayor producción primaria vegetal, los consumidores deben ser capaces de mantener mayores

poblaciones que disminuyan su probabilidad de extinción local, y por tanto la riqueza se eleva. Por transitividad, el NDVI se ha relacionado con la riqueza de especies tanto desde el punto de vista teórico como empíricamente (Seto & *al.* 2004).

Estos índices espectrales son considerados como Variables Esenciales de Biodiversidad por la Red de Observadores de Biodiversidad del Grupo sobre Observación de la Tierra (*Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network* - GEO BON 2015, Scholes & *al.* 2012) en un esfuerzo por hacer operativos los indicadores de monitoreo, en apoyo al seguimiento de las Metas de Aichi. Específicamente, son indicadores funcionales de los ecosistemas y se pueden emplear para derivar otros índices asociados a la actividad fotosintética, la biomasa, la productividad primaria neta, el secuestro de carbono y el estrés hídrico (Nagendra & *al.* 2013, Pereira & *al.* 2013).

Los dos índices de vegetación empleados en este trabajo tienen un alto grado de correlación entre sus valores, debido a que se apoyan principalmente en las reflectancias a las mismas longitudes de onda (rojo e infrarrojo cercano), que son zonas del espectro cuya absorbancia está muy determinada en las plantas por la concentración de clorofila y el contenido de agua. Sin embargo, a pesar de esta redundancia, se muestra que los comportamientos entre zonas no son exactamente iguales. Al NDVI se le ha señalado como desventajas el comportamiento no lineal y asintótico, que hace que a niveles elevados de Índice de Área Foliar (LAI) se vuelve relativamente insensible a las variaciones de la vegetación, con lo cual se reduce su eficiencia para diferenciar las propiedades entre coberturas densas. Tampoco es sensible al verde cuando la cubierta vegetal es demasiado baja (Zhongming & *al.* 2009) ni tiene en cuenta las potenciales influencias del suelo.

Por estas desventajas del NDVI fue desarrollado el EVI, que contiene más información ya que también emplea la región de reflectancia azul, con lo cual sobrepasa en eficiencia al NDVI en las regiones de elevado LAI y permite corregir diferencias en las señales de fondo del suelo. La inclusión del azul también reduce influencias atmosféricas, como la dispersión producida por aerosoles (Huete & *al.* 2002). Estas razones fundamentan la diferencia encontrada entre las proporciones de áreas del JBN en las categorías de valores altos, medios o bajos de cada índice. En ambos casos, al ser índices basados en tasas entre bandas, tienen la ventaja de que influencias atmosféricas no selectivas, ruidos o errores globales que afectan por igual a todas las bandas de las imágenes (nubes, sombras, ángulos de incidencia, topografía) o errores atribuibles a la calibración, son minimizadas ya que se simplifican al estar tanto en el numerador como en el denominador.

El comportamiento espectral de la zona Vegetación sobre Serpentina llama la atención, por su variabilidad y la marcada tendencia al incremento. El promedio de los valores obtenidos

para esta zona es bastante inferior al registrado para los cuabales por Cruz & *al.* (2020) (entre 0,6 y 0,8), aunque coincidió en que fueron los menores valores entre todas las formaciones estudiadas. Sin embargo, dada la pequeña extensión de esta zona y los escasos puntos de muestreo incluidos, se requeriría un estudio a mayor resolución y que comparase su respuesta espectral con zonas naturales homólogas, para ratificar los indicadores de éxito en su implementación mencionados por Berazaín (1981).

Es importante recordar que los índices espectrales de vegetación no están diseñados para cuantificar directamente variables físicas como concentraciones, densidades o abundancias, a pesar de correlacionarse directamente con ellas. Los índices espectrales se destinan al mapeo de estimados relativos, que luego pueden interpretarse en términos de las condiciones del ecosistema (Asner 1998). Sin embargo, a partir de las variables espectrales sí se pueden derivar algunas variables biogeofísicas de interpretación ecológica más directa, a través de varios modelos matemáticos que se han desarrollado, con los cuales, en ausencia de estimadores de campo, pudieran ser utilizadas para caracterizar y monitorear las cubiertas vegetales (por ejemplo: Del Grosso & *al.* 2018). Cáceres & *al.* (2015) estimaron, a partir del EVI y otros indicadores espectrales, la cantidad de biomasa en zonas de pasto. El satélite *Sentinel 2* ya deriva automáticamente variables como el LAI, el Contenido de Clorofila en Hojas (*Leaf Chlorophyll Content* - LCC) y la Cubierta foliar (*Leaf Cover* - LC), que pueden emplearse en el monitoreo de propiedades de la vegetación. Recientemente, Moreno-Martínez & *al.* (2018), al combinar con algoritmos de aprendizaje de máquina datos de MODIS, *Landsat*, climáticos y registros de la *Plant Trait Database TRY* (<http://www.try-db.org>) publicaron mapas mundiales de alta resolución de rasgos foliares como el área foliar específica (*specific leaf area* - SLA), contenido de materia seca de las hojas (*leaf dry matter content* - LDMC), nitrógeno en hojas por unidad de área y contenido de fósforo por área.

El empleo de índices espectrales de vegetación como variables de monitoreo de cambios poseen como ventaja su elevada constancia, ya que los sensores sobre los satélites son los mismos siempre (no hay variación en el grado de error en la toma de datos) y las mediciones son automatizadas (sin intervención humana) y de alta repetibilidad, dada por la resolución temporal de los satélites. Los sensores remotos proveen de un enfoque efectivo, en tiempo y costos, para el monitoreo de recursos naturales a cualquier escala lo suficientemente amplia como para que sea poco práctico el monitoreo directo sobre el suelo, incluso hasta niveles nacionales. Con el desarrollo de las plataformas de cómputo en la nube con acceso automatizado a *petabytes* de datos geoespaciales, como los de *Google Earth Engine*, en la actualidad se ha hecho cada vez más asequible y sencillo el análisis de los grandes volúmenes de información requeridos para el estudio o monitoreo de extensas regiones durante amplios períodos de tiempo (por ejemplo: Gorelick & *al.* 2017, Murray & *al.* 2018).

Como una ventaja adicional, los mapas del JBN digitalizados en el desarrollo de este estudio y las imágenes satelitales, pueden servir de apoyo a otros trabajos. Así, por ejemplo, se actualizan las extensiones, total y por área, del JBN a 471,4 ha. En la literatura previa se habían manejado valores aproximados de 600 ha (Anónimo 1988), 500 ha (Leiva 1988a) y 550 ha (Mugica & Acosta 2020). La diferencia en los límites y áreas puede estar dada por sucesos históricos, como la donación, en la década de los 80, de una extensión extrema de la Zona de Asia al Campamento Celia Sánchez de la Organización de Pioneros José Martí (R. Berazaín 2020, com. pers.) y el corrimiento del muro exterior durante su construcción, en el 2011, para facilitar el trabajo hacia áreas más cercanas al vial construido para el movimiento de los equipos (A. Díaz 2020, com. pers.). Estos sucesos condujeron a que una zona de 21,2 ha, inicialmente prevista dentro del jardín, quedase fuera del muro perimetral (equivalente a la extensión de la Zona de África). Esta área en la actualidad ha desarrollado un saludable bosque de galería, con valores medios de NDVI en la última década, superiores incluso al resto de las zonas del JBN ($0,81 \pm 0,04$).

Los mapas digitalizados también pueden integrarse a nuevas tecnologías móviles, como los celulares inteligentes y los receptores GNSS o GPS, para desarrollar nuevas formas de registro y ubicación de las especies vegetales dentro de las colecciones de campo, o perfeccionar las formas previas existentes (Camino & Leiva 1993, Camino & *al.* 1998, Camino & Montesinos 2015). Con estos mapas se puede implementar, en las zonas arboladas dentro del JBN, el monitoreo remoto del sistema *Global Forest Watch* (<http://www.globalforestwatch.org/>) que a partir de las respuestas espectrales brinda actualmente, a nivel mundial, un servicio de seguimiento en tiempo real de las propiedades de zonas arbóreas. Este sistema emite alertas automáticas cuando son detectados cambios que pudiesen estar relacionados a deforestación o a disminución de la calidad de los bosques, tanto por vía de correo electrónico o por SMS a los teléfonos celulares que se inscriban (<http://www.globalforestwatch.org/>).

Una desventaja a reconocer del presente estudio es lo grueso de las resoluciones temporales y espaciales, por el hecho de resumir la variabilidad por décadas y por emplear imágenes *Landsat* con 30 m de resolución espacial (considerada una resolución media). Por ello, los resultados deben ser considerados como exploratorios y pueden servir de base a estudios de mayor resolución, en áreas más específicas. Los índices espectrales de vegetación también pueden servir para evaluar procesos a más corto plazo como los cambios estacionales, la dinámica anual o la fenología global de algunas áreas y su comparación con formaciones análogas naturales, como indicador del grado de similitud logrado en la replicación de estas (da Silva & *al.* 2020, Zeng & *al.* 2020). En lugar de los satélites *Landsat*, de la NASA, una buena alternativa es la serie *Sentinel*, del programa Europeo Copérnico, los cuales poseen mayor resolución espacial (10 m), temporal (10 días) y radiométrica (12 bits), y son también de acceso gratuito (Geudtner & *al.* 2014, Bórnez & *al.* 2020).

Estos tienen la desventaja de que no poseen una historia de registro tan larga como los *Landsat*, ya que los primeros fueron puestos en órbita en 2015, mientras que aquellos se encuentran informados desde 1974.

CONCLUSIONES

Los índices espectrales de vegetación NDVI y EVI mostraron que las distintas zonas del JBN tienen respuestas espectrales propias, cuyos valores centrales pueden llegar a ser marcadamente diferentes. De forma general se evidenció una tendencia histórica hacia el aumento de los valores de estos indicadores, consistente con el desarrollo y maduración de la vegetación de origen artificial. En el momento actual, la mayor parte de la extensión superficial del JBN posee valores relativamente elevados de índices de vegetación. Este estudio sienta las bases para un sistema de monitoreo remoto del estado de la vegetación y detección de cambios, si se aprovechan las ventajas de los productos satelitales. Futuros pasos podrían asociarse a la evaluación de otros indicadores espectrales y variables derivadas, su calibración por medio de datos tomados en tierra y la evaluación de otros cambios a mayor resolución espacial y temporal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a Rosa Rankin, Carlos Sánchez y Alejandro Palmarola por la revisión y aportes realizados al manuscrito en su versión preliminar. A Alejandro Palmarola, además, por brindar su GPS para las validaciones de los mapas en el campo y apoyar, junto a Larisa Castillo, en la toma de los puntos de control en tierra. Los autores agradecen a los revisores anónimos por sus exhaustivas revisiones y a los editores de la Revista del Jardín Botánico Nacional por sus sugerencias y comentarios.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

F.L. Felipe escribió la primera versión del manuscrito. D. Denis concibió la idea original y diseñó la investigación. Ambos autores contribuyeron a la toma de datos y su análisis estadístico, la discusión de los resultados y la revisión crítica del manuscrito.

CUMPLIMIENTO DE NORMAS ÉTICAS

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Aprobación de ética: Todos los autores han llevado a cabo el trabajo de campo y la generación de datos de forma ética, incluida la obtención de permisos adecuados.

Consentimiento para la publicación: Todos los autores han dado su consentimiento para publicar este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anónimo. 1988. El vigésimo aniversario de la fundación del Jardín Botánico Nacional de Cuba. *Revista Jard. Bot. Nac. Univ. Habana* 9(3): 3-10.

Asner, G. 1998. Fuentes biofísicas y bioquímicas de variabilidad en la reflectancia del dosel. *Teledetección del Medio Ambiente* 64: 234-253.

Berazaín, R. 1981. La zona de vegetación serpentinícola del Jardín Botánico Nacional. *Revista Jard. Bot. Nac. Univ. Habana* 2(2): 151-181.

Boelman, N.T., Stieglitz, M., Rueth, H.M., Sommerkorn, M., Griffin, K.L., Shaver, G.R. & Gamon, J.A. 2003. Response of NDVI, biomass, and ecosystem gas exchange to long-term warming and fertilization in wet sedge tundra. *Oecologia* 135: 414-421. <https://doi.org/10.1007/s00442-003-1198-3>

Bórnez, K., Descals, A., Verger, A., & Peñuelas, J. 2020. Land surface phenology from VEGETATION and PROBA-V data. Assessment over deciduous forests. *Int. J. Appl. Earth Obs Geoinf.* 84:101974. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101974>

Cáceres, J., Martín, M.P. & Salas, J. 2015. Análisis temporal de biomasa y stocks de carbono en un ecosistema de hebra mediante imágenes *Landsat*, y su relación con factores climáticos. *Cien. Espac.* 8(1): 190-211. <https://doi.org/10.5377/ce.v8i1.2049>

Camino, M. & Leiva, A. T. 1993. Experiencia en la implantación del Registro de plantas del Jardín Botánico Nacional. *Boletín de los Jardines Botánicos de América Latina.* 3: 23-26

Camino, M., Soteras, R., Leiva, A.T. & Montesinos, G. 1998. SISPLANT Software para el manejo de la colección de plantas vivas del Jardín Botánico Nacional. *Revista Jard. Bot. Nac. Univ. Habana* 19: 163-164.

Camino, M. & Montesinos, G. 2015. Tercera edición del Catálogo de plantas vivas del Jardín Botánico Nacional. *Revista Jard. Bot. Nac. Univ. Habana* 36: 223-224.

Cerdeira-Estrada, S., Lorenzo-Sánchez, S., Areces-Mallea, S. & Martínez-Bayón, C. 2008. Mapping of the spatial distribution of benthic habitats in the Gulf of Batabanó using *Landsat-7* images. *Ciencias Marinas* 34(2): 213-222. <https://doi.org/10.7773/cm.v34i2.1293>

Cobos, M.E., Cruz, D.D. & Hernández, M. 2016. Análisis multitemporal del Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación (NDVI) en Cuba. *Revista Jard. Bot. Nac. Univ. Habana* 37: 15-18.

Cruz, D.D., Curbelo E.A., Ferrer-Sánchez Y. & Denis, D. 2020. Variaciones espaciales y temporales en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en Cuba. *Ecosistemas* 29(1):1885.

Da Silva, V.S., Salami, G., da Silva, M.I.O., Silva, E.A., Monteiro Junior, J.J., & Alba, E. 2020. Methodological evaluation of vegetation indexes in land use and land cover (LULC) classification. *Geol. Ecol. and Landsc.* 4(2): 159-169. <https://doi.org/10.1080/24749508.2019.1608409>

Del Grosso, S.J., Parton, W., Stohlgren, T., Zheng, D., Bachelet, D., Prince, S. & Olson, K.R. 2008. Global potential net primary production predicted from vegetation class, precipitation, and temperature. *Ecology* 89(8): 2117-2126. <https://doi.org/10.1890/07-0850.1>

Del Grosso, S.J., Parton, W.J., Derner, J.D., Chen, M. & Tucker, C.J. 2018. Simple models to predict grassland ecosystem C exchange and actual evapotranspiration using NDVI and environmental variables. *Agricultural and Forest Meteorology* 249: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.11.007>

Denis, D. 2015. Análisis multitemporal de imágenes *Landsat* para evaluar las variaciones de la cobertura vegetal emergente en la laguna Leonero, Granma, Cuba. *Revista Jard. Bot. Nac. Univ. Habana* 36: 47-53.

Denis, D., Curbelo, E.A., Madrigal-Roca, L.J. & Pérez-Lanyau, R.D. 2020. Variación espaciotemporal de la respuesta espectral en manglares de La Habana, Cuba, a través de sensores remotos. *Int. J. Trop. Biol.* 68(1): 321-335. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68i1.39134>

Detsch, F., Otte, I., Appelhans, T. & Nauss, T. 2016. A comparative study of cross-product NDVI dynamics in the Kilimanjaro region-A matter of sensor, degradation calibration, and significance. *Remote Sens.* 8: 159. <https://doi.org/10.3390/rs8020159>

Evans K.L., Greenwood, J.J.D. & Gaston, K.J. 2005. Dissecting the species-energy relationship. *Proc. R. Soc. B.* 272: 2155-216. <https://doi.org/10.1098/rspb.2005.3209>

- Fairbanks, D. & McGwire, K. 2004. Patterns of floristic richness in vegetation communities of California: Regional scale analysis with multi-temporal NDVI. *Global Ecol. Biogeog.* 13(3): 221-235. <https://doi.org/10.1111/j.1466-822X.2004.00092.x>
- Feeley, K.J., Gillespie, T. & Terborgh, J. 2005. The utility of spectral indices from lysat ETM+ for measuring the structure y composition of tropical dry forests. *Biotropica* 37(4): 508-519. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2005.00069.x>
- Felipe, F.L. 2018. Evaluación de la capacidad de los índices espectrales para la discriminación entre formaciones vegetales en Cuba. Tesis de Diploma. Universidad de La Habana, Cuba.
- GEO BON. 2015. Global Biodiversity Change Indicators V 1. 2. Groups on Earth Observations, Biodiversity Observation Network Secretariat. Leipzig, Germany.
- Geudtner, D., Torres, R., Snoeij, P., Davidson, M., & Rommen, B. 2014. Sentinel-1 system capabilities and applications. Pp.1457-1460. En: IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. <https://doi.org/10.1109/igars.2014.6946711>
- Gillespie, T.W., Ostermann-Kelm, S., Donga, C., Willis, K.S., Okin G.S. & MacDonald, G.M. 2018. Monitoring changes of NDVI in protected areas of southern California. *Ecological Indicators* 88: 485-494. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.01.031>
- Gonzaga, C.A. 2015. Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales para análisis de coberturas vegetales en la provincia de Loja, Ecuador. *Revista CEDAMAZ* 5(1): 30-4.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. & Moore, R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202: 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Goulart, F., Leyva, A., Nelson, E. & Soares-Filho, B. 2018. Conservation lessons from Cuba: Connecting science and policy. *Biol. Cons.* 217: 280-288. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.10.033>
- Hernance, J.F., Augustine, D.J. & Derner, J.D. 2015. Quantifying characteristic growth dynamics in a semi-arid grassland ecosystem by predicting short-term NDVI phenology from daily rainfall: a simple four parameter coupled-reservoir model. *Int. J. Remote Sens.* 36(22): 5637-5663. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1103916>
- Hernández, E. 1985. Las palmas en el Jardín Botánico Nacional. *Revista Jard. Bot. Nac. Univ. Habana* 6(1): 9-17.
- Hernández, M. & Cruz, D. 2016. Cobertura de vegetación natural en Parques Nacionales de Cuba: análisis multitemporal y variación futura de las condiciones bioclimáticas. *Revista Jard. Bot. Nac. Univ. Habana* 37: 93-102.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodríguez, E.P., Gao, X. & Ferreira, L. G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 83(1): 195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Huntington, J.L., Hegewisch, K.C., Daudert, B., Morton, C.G., Abatzoglou, J.T., Mcevoy, D.J. & Erickson, T. 2017. Climate Engine. Cloud Computing and Visualization of Climate and Remote Sensing Data for Advanced Natural Resource Monitoring and Process Understanding. *Am. Meteor. Soc. BAMS* 2397-2409. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00324.1>
- Jetz, W., McGeoch, M.A., Guralnick, R., Ferrier, S., Beck, J., Costello, M.J., Fernandez, M., Geller, G.N., Keil, P., Merow, C., Meyer, C., Muller-Karger, F.E., Pereira, H.M., Regan, E.C., Schmeller, D.S. & Turak, E. 2019. Essential biodiversity variables for mapping and monitoring species populations. *Nature Ecol. Evol.* <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0826-1>
- Kerr, J.T. & Ostrovsky, M. 2003. From space to species: ecological applications for remote sensing. *Trends Ecol. Evol.* 18: 299-305. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00071-5](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00071-5)
- Klijn, F. (Ed.) 1994. Ecosystem classification for environmental management. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Países Bajos. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-1384-9>
- Lascurain, M., Gómez, O., Sánchez, O., & Hernández, C.C. 2006. Jardines botánicos. Conceptos, operación y manejo. Asociación Mexicana de Jardines Botánicos (número especial 5).
- Leiva, A.T. 1975. El Jardín Botánico Nacional de Cuba: realidad y perspectivas. *Wiss. Beitr. Martin-Luther-Univ. Halle-Wittenberg* 6: 34-38.
- Leiva, A.T. 1980. Plantas cubanas en el Jardín Botánico Nacional. *Revista Jard. Bot. Nac. Univ. Habana* 1(2/3): 91-114.
- Leiva, A.T. 1981. Notas acerca de la historia y organización científica de los jardines botánicos del mundo. *Revista Jard. Bot. Nac. Univ. Habana* 2(3): 69-115.
- Leiva, A.T. 1988a. Los Jardines Botánicos y la conservación de las especies vegetales en Cuba. *Revista Jard. Bot. Nac. Univ. Habana* 9(3): 13-22.
- Leiva, A.T. 1988b. El vigésimo aniversario de la fundación del Jardín Botánico Nacional de Cuba. *Revista Jard. Bot. Nac. Univ. Habana* 9(3): 3-10.
- Mack, R.N., & Lonsdale, W.M. 2001. Humans as global plant dispersers: Getting more than we bargained for. *BioSc.* 51: 95-102. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0095:hagpdq\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0095:hagpdq]2.0.co;2)
- Morejón, M., Vega, M., Escarré, A., Gómez, R. & Febles, J.M. 2010. Clasificación de la vegetación en los sectores superiores de cuencas de la región occidental de Pinar del Río utilizando la teledetección. *Cienc. Tierra Esp.* 11: 60-68.
- Moreno-Martínez, Á., Camps-Valls, G., Kattge, J., Robinson, N., Reichstein, M., van Bodegom, P., Kramer, K., Cornelissen, J.H.C., Reich, P., Bahn, M., Niinemets, U., Peñuelas, J., Craine, J., Cerabolini, B.E.L., Minden, V., Laughlin, D.C., Sack, L., Allred, B., Baraloto, C., Byun, C., Soudzilovskaia, N.A. & Running, S.W. 2018. A methodology to derive global maps of leaf traits using remote sensing and climate data. *Remote Sens. Environ.* 218: 69-88. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.006>
- Mugica, L. & Acosta, M. 2020. Lista de las aves registradas en el Jardín Botánico Nacional de Cuba entre 1983 y 2019. *Revista Jard. Bot. Nac. Univ. Habana* 41: 45-55.
- Murray, N.J., Keith, D.A., Simpson, D., Wilshire, J.H. & Lucas, R.M. 2018. REMAP: An online remote sensing application for land cover classification and monitoring. *Methods Ecol. Evol.* 9: 2019-2027. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13043>
- Nagendra, H., Lucas, R., Honrado, J.P., Jongman, R.H., Tarantino, C., Adamo, M. & Mairota, P. 2013. Remote sensing for conservation monitoring: assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats. *Ecol. Indic.* 33: 45-59. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.09.014>
- Navarro, L.M., Fernández, N., Guerra, G., Guralnick, R., Kissling, W.D., Londoño, M.C., Muller-Karger, F., Turak, E., Balvanera, P., Costello, M.J., Delavaud, A., El Serafy, G.Y., Ferrier, S., Geijendorffer, I., Geller,

- G.N., Jetz, W., Kim, E.S., Kim, H.J., Martin, C.S., McGeoch, M.A., Mwampamba, T.H., Nel, J.L., Nicholson, E., Pettorelli, N., Schaepman, M.E., Skidmore, A., Pinto, I.S., Vergara, S., Vihervaara, P., Xu, H., Yahara, T., Gill, M. & Pereira, H.M. 2017. Monitoring biodiversity change through effective global coordination. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 29:158-169. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.02.005>
- Neigh, C.S.R., Tucker, C.J. & Townshend, J.R.G. 2008. North American vegetation dynamics observed with multi-resolution satellite data. *Remote Sens. Environ.* 112: 1749-1772. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.08.018>
- Pautasso, M. & Parmentier, I. 2007. Are the living collections of the world's botanical gardens following species-richness patterns observed in natural ecosystems? *Bot. Helv.* 117(1):1528. <https://doi.org/10.1007/s00035-007-0786-y>
- Pereira, H.M., Ferrier, S., Walters, M., Geller, G.N., Jongman, R.H.G., Scholes, R.J., Bruford, M.W., Brummitt, N., Butchart, S.H.M., Cardoso, A.C., Coops, N.C., Dulloo, E., Faith, D.P., Freyhof, J., Gregory, R.D., Heip, C., Höft, R., Hurtt, G., Jetz, W., Karp, D.S., McGeoch, M.A., Obura, D., Onoda, Y., Pettorelli, N., Reyers, B., Sayre, R., Scharlemann, J.P.W., Stuart, S.N., Turak, E., Walpole, M. & Wegmann, M. 2013. Essential biodiversity variables. *Science* 339: 277-278. <https://doi.org/10.1126/science.1229931>
- Pettorelli, N. 2013. The normalized differential vegetation index. Oxford University Press. Oxford, UK. <https://doi.org/10.1093/acprof:osobl/9780199693160.001.0001>
- Pettorelli, N., Chauvenet, A.L.M., Dufy, J.P., Cornforth, W.A., Meillere, A. & Baillie, J.E.M. 2012. Tracking the effect of climate change on ecosystem functioning using protected areas: Africa as a case study. *Ecol. Ind.* 20: 269-276. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.02.014>
- Ponvert-Delisle, B. 2016. Algunas consideraciones sobre el comportamiento de la sequía agrícola en la agricultura de Cuba y el uso de imágenes por satélites en su evaluación. *Revista Cultivos Tropicales* 37(3): 22-41.
- Richards, J.A. & Jia, X. 2006. Remote sensing digital image analysis: an introduction. 4ta Ed. Springer Nature Switzerland AG. Basilea, Suiza.
- Rouse, J.W., Haas, R.W., Schell, J.A., Deering, D.H. & Harian, J.C. 1974. *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green-wave effect) of natural vegetation*. NASA/GSFCT. Greenbelt, MD, USA.
- Sacristán, F. 2006. La tecnología al servicio del medio ambiente. *Revista Cubana de Meteorología* 13(1): 51-55.
- Scholes, R.J., Walters, M., Turak, E., Saarenmaa, H., Heip, C.H.R., Ó Tuama, E., Faith, D.P., Mooney, H.A., Ferrier, S., Jongman, R.H.G., Harrison, I.J., Yahara, T., Pereira, H.M., Larigauderie, A., Geller, G. 2012. Building a global observing system for biodiversity. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 4: 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2011.12.005>
- Seto, K.C., Fleishman, E., Fay, J.P. & Betrus, C.J. 2004. Linking spatial patterns of bird and butterfly species richness with *Landsat* TM derived NDVI. *Int. J. Remote Sens.* 25(20): 4309-4324. <https://doi.org/10.1080/0143116042000192358>
- Steven, M.D., Malthus, T.J., Baret, F., Xu, H. & Chopping, M.J. 2003. Intercalibration of vegetation indices from different sensor systems. *Remote Sens. Environ.* 88(4): 412-422. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.08.010>
- Tun-Dzul, F.D., Vester, H., Durán, R. & Schmook, B. 2008. Estructura arbórea y variabilidad temporal del NDVI en los "bajos inundables" de la Península de Yucatán, México. *Polibotánica* 25: 69-90.
- Turner, W., Spector, S., Gardiner, N. & Flodely, M. 2003. Remote sensing for biodiversity science y conservation. *Tree* 18: 306-314. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00070-3](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00070-3)
- Villate, M., Pérez Camacho, J., Ricardo, N.E., Acosta, Z., Vento, A.D., González, E., Alfonso, J. & Varela, N. 2016. Especies exóticas invasoras en el Jardín Botánico de Pinar del Río, Cuba. *Acta Bot. Cub.* 215(1): 101-107.
- Walker, L.R. 1991. Summary of the effects of Caribbean hurricanes on vegetation. *Biotropica*. 23(4): 442-447. <https://doi.org/10.2307/2388264>
- Willis, K.S. 2015. Remote sensing change detection for ecological monitoring in United States protected areas. *Biol. Cons.* 182: 233-242. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.12.006>
- Wright, D.H. 1983. Species-energy theory, an extension of species-area theory. *Oikos* 41: 496-506. <https://doi.org/10.2307/3544109>
- Yebra, M. & Chuvieco, E. 2008. Modelos de Simulación de Reflectividad en ecología: potencialidades y problemas. *Ecosistemas* 17(3): 23-38.
- Zalba, S.M., & Nebbia, A.J. 2006. Jardines botánicos y plantas exóticas invasoras: una deuda pendiente. Pp: 40-44. En: Plan de acción de la Red Argentina de Jardines Botánicos, Buenos Aires.
- Zeng, L., Wardlow, B.D., Xiang, D., Hu, S., & Li, D. 2020. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multi-spectral satellite data. *Remote Sens. Environ.* 237: 111511. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111511>
- Zhongming, W., Lees, B.G., Feng, J., Wanning, L. & Haijing, S. 2009. Stratified vegetation cover index: A new way to assess vegetation impact on soil erosion. En: *Catena, ELSEVIER: National Basic Research Program of China (2007CB407203) and National Natural Science Foundation of China (40871246) and Western Light Project of CAS (2009y236)*. No. 83, p: 87-93. <https://doi.org/10.1016/j.cate-na.2010.07.006>