

Identificación de monocultivos de musáceas en los cantones de Matina y Siquirres (Costa Rica) mediante reescalado de imágenes radar de apertura sintética Sentinel 1A

Identification of musaceous crops in the cantons of Matina and Siquirres (Costa Rica) using rescaling of synthetic aperture radar (SAR) Sentinel 1A imagery

Identificação de monoculturas de musaceae nos cantões de Matina e Siquirres (Costa Rica) através do redimensionamento de imagens de radar de abertura sintética Sentinel 1A

MSc. Rubén Martínez Barbáchano¹
Universidad de Costa Rica, Costa Rica



Resumen

Los índices de vegetación derivados de imágenes ópticas son herramientas comúnmente utilizadas para el mapeo de cultivos, pero su eficacia puede verse limitada en regiones con condiciones climáticas adversas, como áreas con alta nubosidad o precipitaciones frecuentes. Frente a estas limitaciones, las mediciones realizadas con Radar de Apertura Sintética (SAR) emergen como una solución viable. El SAR tiene un largo historial de uso en teledetección forestal, donde los modelos de relación entre parámetros forestales estructurales y firmas de retrodispersión medidas son esenciales (Sinha *et al.*, 2015). Un ejemplo notable de esta aplicación se observa en los cantones de Siquirres y Matina, en Costa Rica, donde se ha utilizado la polarización dual del SAR para estimar de forma precisa la extensión de los monocultivos de musáceas.

Los productos de nivel 1 detectados en secuencia rango a nivel del suelo (GRD) consisten en datos SAR que han sido detectados, remuestreados mediante multilook y proyectados sobre un modelo del elipsoide terrestre. Las

¹ MSc. Rubén Martínez Barbáchano, Universidad de Costa Rica,  ruben.martinezbarbachano@ucr.ac.cr,  <http://orcid.org/0000-0002-9176-3112>

imágenes fueron adquiridas en modo IW (Interferometric Wide-swath) con órbitas descendentes, aplicándose un flujo de calibración/procesamiento y un reescalado posterior que permitió discriminar áreas forestales y monocultivos con mayor eficacia que los índices de vegetación radar basados en polarización cruzada. De hecho, la polarización vertical/vertical se mostró eficiente para la identificación de monocultivos de musáceas en los cantones de Matina y Siquirres (Costa Rica).

Palabras clave: Teledetección; radar; SAR; bosques; cultivos.



Abstract

Vegetation indices derived from optical images are commonly used tools for crop mapping, but their effectiveness can be limited in regions with adverse weather conditions, such as areas with high cloudiness or frequent precipitation. Facing these limitations, measurements made with Synthetic Aperture Radar (SAR) emerge as a viable solution. SAR also has a long history of use for forest remote sensing where models of relationships between forest structural parameters and measured backscatter signatures are essential (Sinha *et al.*, 2015). A notable example of this application is observed in the cantons of Siquirres and Matina cantons, in Costa Rica, where dual polarization SAR has been used to accurately estimate the extent of musaceous monocultures.

Level-1 Ground Range Detected (GRD) products consist of focused SAR data that has been detected, multi-looked and projected to ground range using an Earth ellipsoid model. The images were acquired in IW (Interferometric Wide-swath) mode on descending orbits, with a calibration/workflow process and a subsequent rescaling that allowed to draw a clear distinction between forested areas and monocrops more effectively than radar vegetation index based on cross-polarization. In fact, vertical/vertical polarization proved to be efficient for musaceous monocrops identification in the cantons of Matina and Siquirres (Costa Rica).

Keywords: Remote sensing; radar; SAR; forests; crops.



Resumo

Os índices de vegetação derivados de imagens ópticas são ferramentas comumente utilizadas para mapeamento de culturas, mas sua eficácia pode ser limitada em regiões com condições climáticas adversas, como áreas com alta cobertura de nuvens ou chuvas frequentes. Diante dessas limitações, as medições feitas com Radar de Abertura Sintética (SAR) surgem como uma solução viável. O SAR tem uma longa história de uso em sensoriamento remoto florestal, onde modelos da relação entre parâmetros estruturais da floresta e assinaturas de retroespalhamento medidas são essenciais (Sinha *et al.*, 2015). Um exemplo notável desta aplicação é observado nos cantões de Siquirres e Matina, na Costa Rica, onde a dupla polarização SAR tem sido usada para estimar com precisão a extensão das monoculturas de musaceae.

Os produtos Ground Range Sequence Detected Level 1 (GRD) consistem em dados SAR que foram detectados, reamostrados usando multilook e projetados em um modelo

do elipsóide da Terra. As imagens foram adquiridas no modo IW (Interferometric Wide-swath) com órbitas descendentes, aplicando um fluxo de calibração/processamento e um posterior reescalamento que permitiu discriminar áreas florestais e monoculturas de forma mais eficaz do que índices de vegetação radar baseados em polarização cruzada. De fato, a polarização vertical/vertical mostrou-se eficiente para a identificação de monoculturas de musaceae nos cantões de Matina e Siquirres (Costa Rica).

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; radar; SAR; florestas; plantações.

1- Introducción

La teledetección con sensores ópticos requiere de observaciones sin nubes o sombras de nubes para minimizar la confusión espectral de los datos (Shen *et al.*, 2019). Sin embargo, en áreas tropicales la cobertura nubosa es constante y abundante, por lo que su aplicación resulta limitada (Flores *et al.*, 2019). En este sentido, el uso de las imágenes radar despeja la limitante de la nubosidad y permite obtener información de forma continua (Flores *et al.*, 2019). Por ejemplo, las imágenes SAR libres de nubes en banda L se han mostrado ventajosas para monitorear áreas tropicales o subtropicales nubosas y lluviosas (Reiche *et al.*, 2013). En todo caso, no se trata de una tecnología novedosa o reciente. El radar de apertura sintética (SAR) se ha venido utilizando en teledetección los últimos 30 años, proporcionando imágenes de alta resolución, nocturnas y diurnas independientemente de las condiciones meteorológicas, para un amplio rango de aplicaciones desde las geociencias, las investigaciones acerca del cambio climático, el monitoreo ambiental y terrestre, el mapeo 2D y 3D, la detección de cambios, el mapeo 4D (espacio y tiempo) aplicaciones de seguridad hasta la exploración planetaria (Moreira *et al.*, 2013).

La apertura sintética en radar es una técnica que utiliza el procesamiento de la señal para mejorar su resolución, más allá de la limitación impuesta por la apertura de la antena física (Curlander y McDonough, 1991). Esta ventaja se basa en el hecho de que los radar de apertura sintética o SAR están montados sobre plataformas móviles. Son similares a un radar convencional, con ondas electromagnéticas transmitidas secuencialmente y los ecos retrodispersados son captados por la antena. En el caso de los SAR, el tiempo de transmisión/recepción consecutiva se traduce en diferentes posiciones debido al movimiento de la plataforma sobre la que se

asienta la antena. Esto permite simular una apertura de antena muy superior a la que su longitud física permitiría.

El objetivo del presente estudio fue aprovechar las diferentes respuestas obtenidas en el análisis de la retrodispersión que proporcionan los monocultivos intensivos de musáceas en los cantones de Siquirres y Matina, en la vertiente caribeña de Costa Rica. Al tratarse de un espacio afectado de forma persistente por la nubosidad, se optó por comprobar la efectividad el monitoreo de este tipo de cultivos mediante el radar de apertura sintética frente a la teledetección óptica.

El cultivo seleccionado para el estudio (musáceas) ofrece una estructura especialmente favorable para su análisis con radar de apertura sintética. La intensidad de la señal retrodispersada es muy alta, debido a la separación regular de las plantas, su altura uniforme y su estructura foliar (con predominio del fuste). Todo ello redunda en una señal muy alta de retorno, por retrodispersión de volumen y doble rebote.

2- Marco conceptual

La tecnología RADAR opera con sensores activos en el rango de las microondas, debido a que la escasa emitancia de los objetos, difícilmente perceptible en esa banda ([Chuvieco, 2010](#)). Aunque la presencia de agua altera las propiedades dieléctricas del suelo (lo cual afecta a la señal radar) la principal virtud o ventaja que ofrece la tecnología radar es que puede trabajar en cualquier condición atmosférica ([Chuvieco, 2010](#)). Además, al tratarse de un sensor activo capaz de proveer su propia fuente de iluminación, puede trabajar tanto de día como de noche ([Chan y Koo, 2008](#)). Todas estas ventajas son evidentes a la hora de abordar investigaciones de la superficie terrestre en áreas nubosas o con alta pluviosidad, como las tropicales. Sin embargo, hay que considerar que el radar no brinda información biofísica de las coberturas vegetales, sino simplemente morfométrica.

El más simple de los sistemas radar proporciona imágenes de reflectividad 2D del área captada; por ejemplo, objetos con una alta señal retrodispersada son identificados como puntos brillantes en las imágenes radar, mientras las áreas planas y superficies planas se muestran con un color oscuro. La dirección de vuelo es conocida como azimuth y la línea de visión como dirección oblicua de barrido (*slant range direction*). Hasta mediados del siglo XX, las imágenes radar se conocían como SLAR,

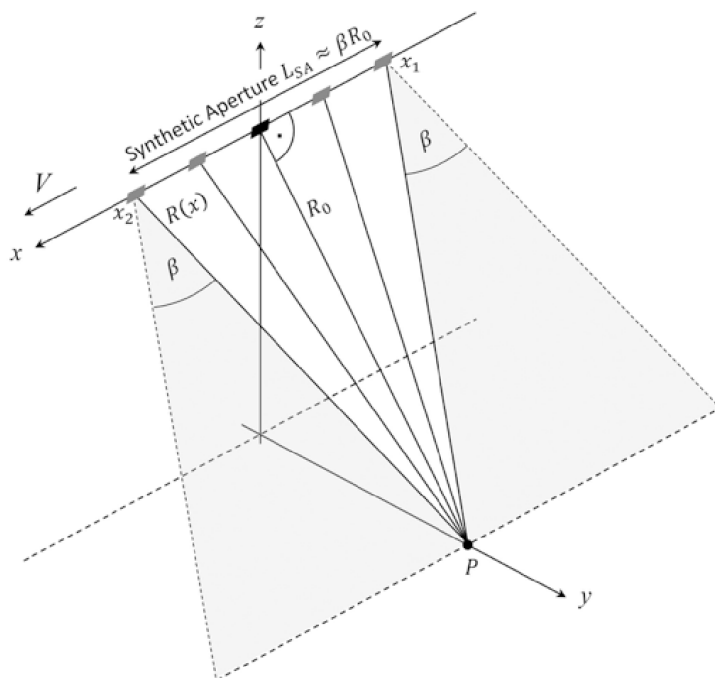
acrónimo de *side-looking airborne radar* (radar aeroportado de visión lateral) y tenían un uso fundamentalmente militar y no se incorporaba el principio de apertura sintética explicado en líneas anteriores. De hecho, hubo que esperar hasta la década de 1960 para acceder a la primera imagen de alta resolución SLAR desclasificada para uso científico (Chan y Koo, 2008). La técnica de radar SLAR implicaba una resolución acimutal moderada, que se degradaba al incrementar el alcance de la señal. La resolución acimutal venía determinada por la menor separación existente entre dos puntos separados en el terreno, que el radar podía detectar. La baja resolución acimutal ha sido el principal inconveniente de los sistemas SLAR, su invención y patente (en 1954) por Carl Wiley.

Posteriormente, con la implementación del principio de propagación del haz Doppler mejoró notablemente la resolución acimutal, complementada poco después con el principio de la apertura sintética de la antena radar. El resultado fue que la resolución acimutal alcanzó valores equivalentes a la mitad de la longitud acimutal de la antena. Esto significaba que para una resolución acimutal de 1,5 metros en la técnica SLAR, se incrementaba 30 veces la capacidad de apertura de la antena. La apertura sintética, por tanto, mejora la resolución de la señal más allá de la limitación impuesta por la apertura física de la antena (Curlandery McDonough, 1991) como se muestra en la Figura 1.

En cuanto a la señal transmitida/recibida, se caracteriza por relacionarse con la orientación del plano de oscilación de la señal propagada por la propia antena. A esto se le conoce comúnmente como polarización. Cuando dicha polarización se propaga linealmente, la orientación de este plano de oscilación es constante a lo largo de la ruta de propagación de la onda electromagnética (Meyer, 2018). Esto explica que las antenas radar transmiten y reciben la señal en dos o más polarizaciones:

- Vertical/vertical
- Vertical/horizontal
- Horizontal/vertical
- Horizontal/horizontal

Figura 1. Geometría de observación de un radar de apertura sintética



Fuente: Meyer, 2018.

De hecho, resulta habitual encontrar sensores radar con distintas bandas de observación, diferentes alturas, diferentes ángulos de observación, diferentes polarizaciones y antenas de tamaño diverso.

Para la presente investigación se utilizó la polarización vertical/vertical y el pto de calibración de la antena gamma cero (γ_0). Este parámetro tiene en cuenta el ángulo de incidencia local y su relación con el relieve, lo que combinado con la rugosidad del dosel forestal hace su uso preferible al de sigma cero (aunque en zonas totalmente llanas de suelo descubierto el resultado puede ser similar). Se utilizó el producto de intensidad (GRDH, *Ground-Range Detected High-resolution*) por su compromiso en cuanto a posibilidad de reducción de ruido mediante filtros Speckle y el menor volumen de datos necesario para cubrir áreas extensas, a pesar de que este nivel de producto tiene una resolución menor que el anterior, ya que se pierde la información de fase, es decir, solo proporciona la potencia retrodispersada.

Gamma cero (γ_0) es una de las tres variables de calibración que pueden obtenerse a partir de Sentinel 1, y representa la potencia retrodispersada que el sensor está midiendo normaliza por el área $A\gamma$. Por otra parte, se utilizó el nivel de producto SLC (Single Look Complex) para generar dos índices de vegetación radar que contuviera la información de fase.

El objetivo del presente estudio fue aprovechar las respuestas diferenciales obtenidas en el análisis de la intensidad de la señal retrodispersada que proporcionan los monocultivos intensivos de musáceas en los cantones de Matina y Siquirres (Costa Rica) con respecto a otras coberturas adyacentes, como áreas forestales. Los primeros le devuelven al sensor un valor mucho más alto, mientras que las segundas típicamente exhiben una señal retrodispersada más baja, lo cual facilita el mapeo de áreas deforestadas en algunas regiones (Shimada *et al.*, 2014).

Muchos estudios han identificado y caracterizado cultivos a partir de la intensidad de la señal retrodispersada (Kussul *et al.*, 2016; Nguyen *et al.*, 2016; Bargiel, 2017; Van Tricht *et al.*, 2018; Mandal *et al.*, 2018; Whelen y Siqueira, 2018; Arias *et al.*, 2020). De igual manera se pueden encontrar múltiples estudios sobre fenología vegetal y ratios de las distintas intensidades de la señal retrodispersada (Nelson *et al.*, 2014; De Bernardis *et al.*, 2015; Nguyen *et al.*, 2016; Lasko *et al.*, 2018; Singha *et al.*, 2019; Fikriyah *et al.*, 2019).

La estructura y morfometría de las plantaciones comerciales de musáceas con fines de exportación (Figura 2) hace que sean muy fáciles de identificar con teledetección óptica. Sin embargo, a nivel espectral, tienden a confundirse con el cultivo de palma aceitera y bosques inundados de palmas silvestres (Pedroni, 2003).

Figura 2. Monocultivo de musáceas en Matina, Costa Rica



Fuente: Elaboración Propia.

Se trata, no obstante, de una técnica ya estudiada en Costa Rica con las antiguas imágenes SAR ERS-1 y 2, que permitieron discriminar las plantaciones de banano con una precisión del 95 % en los cantones de Sarapiquí, Pococí, Guácimo, Siquirres y Matina en el año 1993 ([Verhoeve, 1999](#)).

Dado que el proyecto ERS-2 finalizó en el año 2011, y que el heredero de dicha misión corresponde a la misión Sentinel-1 de Copernicus (con banda C también), el presente estudio se propuso como una opción de continuidad en el seguimiento o monitoreo de este tipo de cultivos.

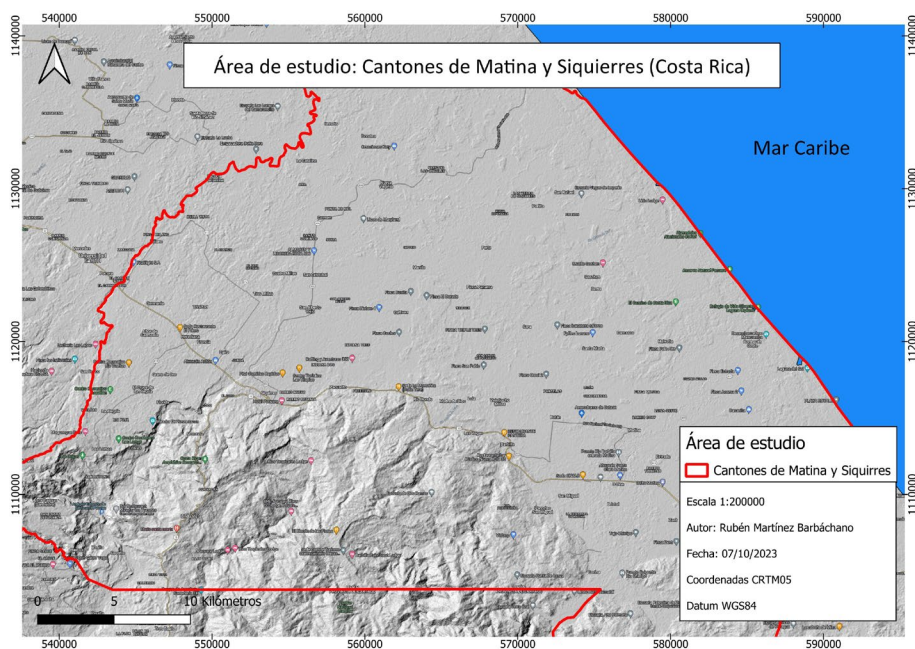
3- Área geográfica de estudio

Con una elevación media de 150 m, estas llanuras predominantes en los cantones objeto del estudio presentan un clima tropical lluvioso todo el año, con una temperatura promedio anual de 24 ° C. La precipitación media anual para el registro de lluvias va desde los 2.000 a los 6.000 mm;

en las partes alta las lluvias son de 4.000 a 6.000 mm, en la parte media de 2.000 a 3.000 mm y en la parte baja de 3.000 a 5.000 mm.. El área de estudio se sitúa en las coordenadas 11° 04' 47" de latitud norte y 84° 16' 42" Oeste (Figura 3). La geología de la zona de estudio muestra rocas volcánicas del Mioceno, Plio-Pleistoceno y Pleistoceno, así como rocas sedimentarias marino someras del Mioceno. En la parte baja predominan las rocas continentales del Holoceno (Rojas, 2011).

El presente estudio se realizó con un total de 12 imágenes correspondientes a julio y agosto del 2023. La razón de las fechas escogidas es comprobar la efectividad del uso de imágenes radar en períodos de alta cobertura nubosa y precipitaciones, que comprometen la disponibilidad de imágenes ópticas.

Figura 3. Localización de la zona de estudio en Costa Rica.



Fuente: Elaboración Propia.

4- Materiales y métodos

El procesamiento de imágenes para la presente investigación se basó en el software SNAP de la Agencia Espacial Europea.

Las imágenes Sentinel-1A fueron descargadas, procesadas y analizadas para discriminar la superficie ocupada por monocultivos de musáceas de coberturas forestales a lo largo de las llanuras aluviales en el norte del país durante el año 2023. Las escenas se obtuvieron con el método Interferometric Wide Swath (IW) que comprende imágenes con nivel de procesamiento en alta resolución y capturadas mediante el modo Ground Range Detected (GRD). Se utilizaron también imágenes SLC (Single Look Complex) que contiene información de fase (aparte de intensidad retrodispersada) para generar dos índices de vegetación radar y comparar los resultados con índices de vegetación obtenidos a partir de Sentinel-2. Se descargaron y procesaron una imagen mensual en modo GRD y SLC de junio del 2022 a junio del 2023, lo que suma un total de 48 imágenes para la zona de estudio.

Para el procesamiento de las imágenes se utilizó el software SNAP Desktop, en su versión 8.0, desarrollado por la ESA y distribuido de forma libre bajo los términos de General Public License (GNU), junto con las herramientas contenidas en la Sentinel-1 Toolbox, que permite realizar correcciones de efemérides, radiométricas y geométricas a diferentes productos radar. Se utilizó el software de SNAP para calibrar las imágenes SAR, cuyo objetivo es ofrecer imágenes en las que los valores de píxel se pueden relacionar directamente con la retrodispersión del radar de la escena. Para ello se deben convertir los valores digitales (DN) a coeficientes de retrodispersión (Song *et al.*, 2007). No obstante, para el cálculo de la retrodispersión debe calcularse beta, que expresa a través de la función:

$$\beta_j^0 = 10 \times \log_{10} [(DN_j^2 + A_3) A_{2j}]$$

Siendo DN_j el valor digital que representa la magnitud de j-ésimo píxel, A_3 un desplazamiento fijo y A_{2j} el valor de ganancia de escalado de j-ésimo píxel en una dirección de rango oblicuo.

El flujo de procesamiento (ver Tabla 1) de las imágenes obtenidas en modo Ground Range Detected (GRD) para la calibración gamma cero (γ_0) a partir de la intensidad de la señal fue el siguiente:

Tabla 1. Flujo de procesamiento de las imágenes Sentinel 1 GRD.

Tipo de procesamiento	Herramientas de software
Corrección orbital	Apply orbit file
Eliminación del ruido termal	Thermal noise removal
Eliminación del ruido de bordes	Border noise removal
Calibración radiométrica de las imágenes	Radiometric / Calibrate
Aplicación de filtro Speckel	Single Product Speckel filter
Corrección geométrica	Range Doppler Terrain Correction
Conversión de datos lineales a escala logarítmica de decibeles	Linear to/from dB
Reescalado de la escala de valores para comparación de imágenes	Data conversion

Fuente: Elaboración propia.

Para el presente estudio se utilizó la polarización vertical/vertical del producto de intensidad (GRDH) de Sentinel-1, por su mayor capacidad de penetración en la estructura del dosel de monocultivos forestales, como las musáceas (Guzmán-Alvarez, *et al.*, 2022).

Para la obtención de índices de vegetación radar el flujo de procesamiento (ver Tabla 2) requiere la información de fase de las imágenes, por lo que se procesaron imágenes Single Look Complex (SLC) con la siguiente secuencia:

Tabla 2. Flujo de procesamiento de las imágenes Sentinel 1 SLC.

Tipo de procesamiento	Herramientas de software
Corrección orbital	Apply orbit file
Eliminación del ruido termal	Thermal noise removal
Eliminación del ruido de bordes	Border noise removal
Calibración radiométrica de las imágenes	Radiometric / Calibrate
Aplicación de filtro Speckel	Single Product Speckel filter
Corrección geométrica	Range Doppler Terrain Correction
Obtención de las matrices C11 y C22	DpRVI y CPRVI

Fuente: Elaboración propia

Un paso importante en el procesamiento de imágenes radar es eliminar el ruido de los bordes. En este caso se trata de un bandeo o franja estrecha que aparece a lo largo de los bordes de la dirección de rango y acimut. La causa está en fallos de procesamiento al documentar áreas con una señal inválida, debida a cambios en la curvatura terrestre (Filipponi, 2019). La herramienta para solucionarlo en SNAP (“Border noise removal”) resulta satisfactoria en tierra, pero no en océanos (Luo y Flett, 2018).

Se procede entonces con la calibración radiométrica. El objetivo de la calibración de imágenes SAR es ofrecer imágenes en las que los valores de píxel se pueden relacionar directamente con la retrodispersión del radar de la escena. Para ello se deben convertir los valores digitales (DN) a coeficientes de retrodispersión (Song *et al.*, 2007). No obstante, para el cálculo de la retrodispersión (gamma) debe calcularse beta, que se expresa a través de la función:

$$\beta_j = 10 \times \log_{10} [(DN_j + A_3) A_2]$$

Siendo DN_j el valor digital que representa la magnitud de j-ésimo píxel, A_3 un desplazamiento fijo y A_2 el valor de ganancia de escalado de j-ésimo píxel en una dirección de rango oblicuo.

Por su parte, para la conversión de datos lineales a escala logarítmica de decibeles (dB) se realizó una transformación de los valores de gamma a dB, utilizando la herramienta de SNAP “Linear to/from dB”, que aplica la siguiente transformación a escala logarítmica:

$$\text{Decibel} = 10 * \log_{10} (\text{linear})$$

5- Resultados y discusión

El resultado del primer procesamiento expuesto en el apartado anterior (la calibración gamma0) fue una imagen raster que muestra (Figura 4) tras el reescalado a 255 niveles digitales, las áreas con presencia de monocultivo de musáceas con mayor intensidad de señal de retorno (color verde más intenso) frente al resto de coberturas. Los valores de píxel por encima de 200 resultaron ser monocultivo de musáceas en un 95 % de los casos. Se confirman, por tanto, varios principios físicos que favorecen una

mayor intensidad de señal retrodispersada para el ángulo de calibración gamma, como son:

- Presencia de agua o humedad en el cultivo, lo que favorece la constante dieléctrica.
- El aumento de la señal por dispersión volumétrica e incluso de doble rebote, debido a la equidistancia de las plantas en los monocultivos intensivos.
- La presencia de pocas hojas de gran tamaño y el predominio del fuste en la estructura foliar, que minimizan el ruido por dispersión de la señal.

Figura 4. Calibración gamma cero (γ_0)



Fuente: Elaboración Propia.

Seguidamente, se optó por comparar los resultados anteriores con el índice de vegetación radar:

$$RVI = 4 \sigma^0 HV / \sigma^0 HH + \sigma^0 HV$$

La modificación de este índice la propusieron Charbonneau *et al.* (2005) para los casos en los que no hay polarización horizontal disponible, como el de las imágenes Sentinel 1. En tal caso, la expresión utilizada fue:

$$RVI = 4 \sigma^0 VH / \sigma^0 VV + \sigma^0 V$$

Dicho índice está pensado para medir la retrodispersión por volumen en polarización dual, características acordes con la estructura regular de las parcelas de monocultivo de musáceas estudiadas (Figura 5).

Figura 5. Índice de vegetación radar (RVI) con polarización dual VV

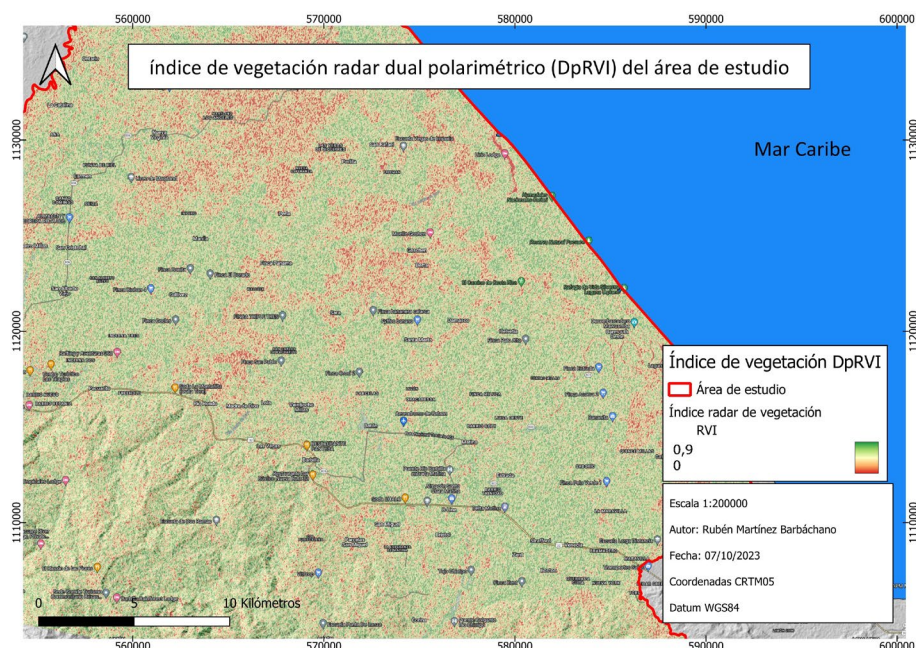


Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados obtenidos (figuras 4 y 5) mediante calibración o ratios de intensidad retrodispersada se realizaron con el nivel de producto GRDH de Sentinel-1. Para los restantes índices se utilizó el nivel de procesamiento SLC (Single Look Complex) que contiene la información de fase. Para

obtener y comparar los resultados de intensidad retrodispersada con los obtenidos a partir de la fase interferométrica se analizaron dos índices. Uno de esos índices es el denominado índice de vegetación radar dual polarimétrico o DpRVI (Figura 6) que ha mostrado ser un buen indicador de la dinámica de crecimiento vegetal en parcelas experimentales de cultivo en Manitoba, Canadá (Mandal, *et al.*, 2020a).

Figura 6. Índice de vegetación radar dual polarimétrico (DpRVI)



Fuente: Elaboración Propia.

Por último, se obtuvo el índice de vegetación radar de polarización compacta o CpRVI (Figura 7), que se correlaciona más con la densidad de plantas por superficie y con el tipo de cultivo, especialmente con el índice PAI (Plant Area Index-PAI) y en menor medida con el contenido en agua de la vegetación (Mandal, *et al.*, 2020b).

Figura 7. Índice de vegetación radar de polarización compacta (CpRVI)



Fuente: Elaboración Propia.

Después del procesamiento y análisis de imágenes, se realizó un muestreo aleatorio de validación de campo en la zona de estudio, mediante la obtención de 40 puntos de muestreo en el interior de las parcelas (Figura 8). Para ello se utilizó equipo GNSS de alta precisión (submétrica) y se excluyeron áreas en el límite exterior de las parcelas, para evitar el efecto borde provocado por píxeles eventualmente mixtos, de musáceas y otras coberturas adyacentes. El resultado tuvo una coincidencia del 100 % entre puntos muestreados y la existencia de monocultivos de musáceas.

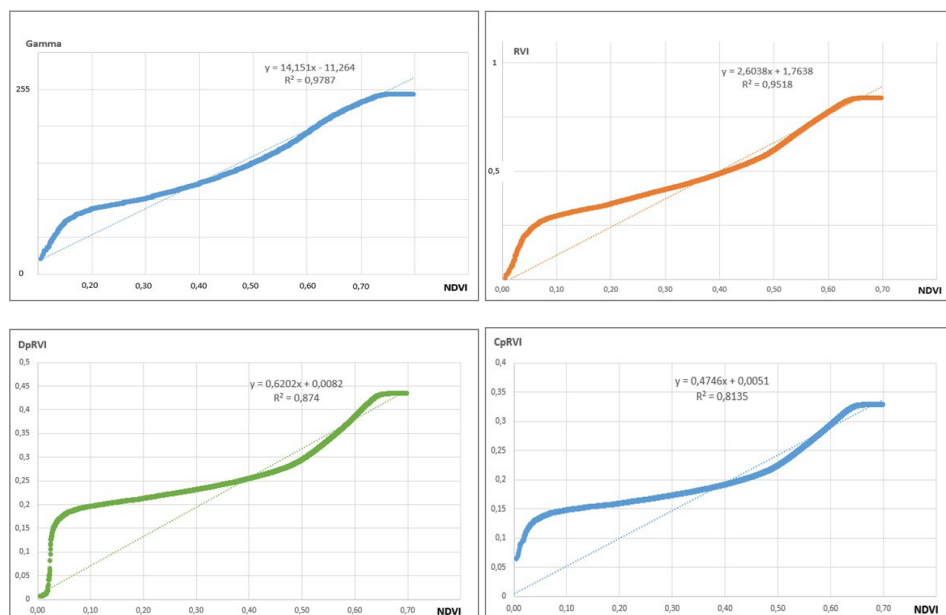
Figura 8. Puntos de verificación en campo dentro de la zona de estudio
(cantones de Matina y Siquirres)



Fuente: Elaboración Propia.

La validación estadística de los resultados se estableció mediante una correlación lineal entre los NDVI (obtenidos a partir de Sentinel 2) con la calibración gamma cero (γ_0) de Sentinel 1 (producto GRD de intensidad) y con los tres índices de vegetación radar (con información de fase); es decir, el RVI modificado de [Charbonneau *et al.* \(2005\)](#) y los índices CpRVI (compact-pol radar vegetation index) y DpRVI (dual polarimetric radar vegetation index) de por [Mandal \(2020a y 2020b\)](#). Los resultados mostraron correlaciones superiores a 0,8 en todos los casos (Figura 9), aunque con matices (el mayor de todos fue la calibración gamma cero).

Figura 9. Índices de correlación y R^2 de los índices radar con respecto al NDVI de la zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

6- Conclusiones

La calibración gamma y el uso de combinaciones polarimétricas de fase en imágenes SAR mostraron un alto potencial de aplicabilidad para el estudio y monitoreo de monocultivos agroforestales bajo condiciones meteorológicas de nubosidad y lluvia persistentes, típicas de áreas tropicales como la vertiente caribeña de Costa Rica. Hay que considerar que la banda C no es, en principio, la más adecuada para estudiar estructuras vegetales de cierta altura (como las plantas de musáceas). Además, la aplicación de filtros speckle para reducir el efecto de moteado implica reducir la resolución espacial de las imágenes SAR, con consecuencias negativas a la hora de mapear y caracterizar un cultivo. De las dos polarizaciones disponibles para imágenes Sentinel-1 (VV y VH) la que ofreció mejores resultados para discriminar cultivos intensivos fue la polarización VV, pues permite diferenciar con claridad zonas forestales, deforestadas y monocultivos de

musáceas. El presente estudio reveló, además, que gamma cero (γ_0) reproduce mejor que ninguna otra variable o índice la señal retrodispersada en el interior de estos monocultivos de musáceas, lo cual permite igualmente discriminar parches de bosque secundario de pastizales.

Aunque los restantes índices mostraron valores R^2 superiores a 0,8, el que mostró mayor capacidad de discriminación de monocultivos fue el índice de vegetación radar o RVI. El DpRVI (*dual polarimetric radar vegetation index*), y presentó una mayor correlación con el NDVI (obtenido a partir de imágenes ópticas Sentinel-2) que el CpRVI (*compact-pol radar vegetation index*). Este tipo de índices requieren de datos polarimétricos basados en la fase, pero los índices basados en polarización dual pueden ser ventajosos a la hora de monitorizar cultivos en áreas extensas (Mandal *et al.*, 2020). La ventaja operativa es evidente en este caso, al permitir cubrir bimensualmente un área de casi 500.000 hectáreas.

Por otra parte, el índice de vegetación radar o RVI podría relacionarse con biomasa en monocultivos de musáceas, dado que los valores por encima de 0,35 se asocian con volúmenes de biomasa de 23 kg/m³ en cultivos de maíz (Kim y Van Zyl, 2004).

Cabe resaltar que las imágenes Sentinel-1 solo poseen dos bandas que corresponden a las polarizaciones vertical/vertical y vertical/horizontal, lo cual obliga a utilizar índices como los propuestos, en ausencia de polarización horizontal. La ventaja de utilizar emplear polarización vertical/vertical es que es sensible a la rugosidad del terreno y a la dispersión por doble rebote (Small, 2011); esto resulta óptimo para discriminar cubiertas como los monocultivos tropicales, muy homogéneos en su morfometría. La morfometría o estructura de estos cultivos, de hecho, podría introducir teóricamente una dificultad a la hora de separar o discriminar musáceas de otros cultivos de la zona (como papaya o piña). Sin embargo, su característica estructura interna (una altura por planta en torno a los 2 metros y una separación entre plantas de unos 3 metros) se traduce en una respuesta característica, sistemática y predecible, próxima a los 255 niveles digitales después de la aplicación de un reescalado a la imagen en escala logarítmica (decibeles). Ello permitiría eventualmente utilizar tanto las imágenes calibradas en gamma como los índices expuestos para realizar análisis multitemporales de monitoreo de estos monocultivos.

Otro aspecto crítico en el procesamiento de imágenes radar de apertura sintética es el efecto de desplazamiento por relieve o *foreshortening*, el sombreado topográfico y las variaciones locales de resolución, que son frecuentemente ignoradas o incorrectamente modeladas (Small, 2011) pero en el área de estudio dichos problemas no se presentan (al menos de forma significativa) al tratarse de llanuras aluviales de topografía extremadamente plana. Para áreas montañosas se recomienda sustituir la calibración de coeficientes de retrodispersión convencional, basada en el elipsoide, por otra de coeficientes corregidos a topografía plana (Dostálová *et al.*, 2022).

El presente estudio mostró que la utilización de la intensidad (gamma) y fase, con polarización dual (vertical/vertical y vertical/horizontal) en Sentinel-1 son suficientes para delimitar y caracterizar la fase productiva de plantaciones de musáceas. Sin embargo, hay algunos aspectos que requieren una profundización en los mecanismos de retrodispersión en banda C, como la heterogeneidad a nivel intraparculario. Para comparaciones multitemporales, por ejemplo, podría resultar útil la desviación estándar de señal retrodispersada intraparcularia. Esta variable también podría resultar clave a la hora de generar clasificaciones.

Un último aspecto a tener en cuenta es la influencia del agua en la señal retrodispersada, dado que las imágenes utilizadas pertenecían a Sentinel 1A, que cubría el área de estudio en la noche (después de las tormentas y precipitaciones diarias, habitualmente producidas en la tarde). Idealmente se podría haber trabajado con Sentinel 1B (que proporcionaba datos matinales en Costa Rica) pero debido a una anomalía relacionada con la fuente de alimentación de la electrónica del instrumento, Sentinel 1B dejó de entregar datos en diciembre del 2021.

A pesar de todo ello, el presente estudio reveló que gamma cero (γ_0) en intensidad, y los índices de vegetación de polarización dual determinan la señal retrodispersada en el interior de estos monocultivos de forma igual o más efectiva que los tradicionales índices de vegetación obtenidos con imágenes ópticas.

BIBLIOGRAFÍA

- Arias, María & Campo-Bescós, Miguel & Alvarez-Mozos, Jesús. (2020). Crop Classification Based on Temporal Signatures of Sentinel-1 Observations over Navarre Province, Spain. *Remote Sensing*. 12. 278. [10.3390/rs12020278](https://doi.org/10.3390/rs12020278).
- Bargiel, D. (2017). A new method for crop classification combining time series of radar images and crop phenology information. *Remote Sensing of Environment*, 198, 369-383. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.022>.
- Chan, Y. K. y Koo, V. (2008). An Introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR). *Progress In Electromagnetics Research B*, 2, 27-60. doi:[10.2528/PIERB07110101](https://doi.org/10.2528/PIERB07110101).
- Charbonneau, F., Trudel, M. y Fernandes, R. (2005). Use of Dual Polarization and Multi-Incidence SAR for soil permeability mapping. *Proceedings of the 2005 Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) Workshop*, St-Hubert, QC, Canada.
- Chuvieco-Salinerio, E. (2010). Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio. *Editorial Ariel*.
- Curlander, J. C. y McDonough, R. N. (1991). Synthetic aperture radar. Wiley, New York, (Vol. 11).
- De Bernardis, C. G., Vicente-Guijalba, F., Martinez-Marin, T., y Lopez-Sanchez, J. M. (2015). Estimation of key dates and stages in rice crops using dual-polarization SAR time series and a particle filtering approach. *IEEE J. Select. Topics Appl. Earth Observ. Rem. Sens.*, 8(3), 1008-1018. doi: [10.1109/JSTARS.2014.2372898](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2372898).
- Dostálová, A., Navacchi, C., Greimeister-Pfeil, I., Small, D. y Wagner, W. (2022). The effects of radiometric terrain flattening on SAR-based forest mapping and classification. *Remote Sensing Letters*, 13, 855-864. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/2150704X.2022.2092911>.
- Fikriyah, V. N., Darvishzadeh, R., Laborte, A., Khan, N. I. y Nelson, A. (2019). Discriminating transplanted and direct seeded rice using Sentinel-1 intensity data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 76, 143-153. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.11.007>.

- Filipponi, F. (2019). Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow. *Proceedings*, 18(1), 11. <http://dx.doi.org/10.3390/ECRS-3-06201>.
- Flores-Anderson, A. I., Herndon, K. E., Bahadur, R. y Cherrington, E. (Eds.). (2019). The Synthetic Aperture Radar (SAR) Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation. *SERVIR Global Science*. <https://doi.org/10.25966/nr2c-s697>.
- Guzmán-Álvarez, J., González-Zúñiga, M., Fernández, J. y Calvo-Alvarado, J. (2022). Use of remote sensing in agriculture: Applications in banana crop. *Agronomía Mesoamericana*, 33(3). <https://doi.org/10.15517/am.v33i3.48279>.
- Kim, Y. y van Zyl, J. (2004). Vegetation effects on soil moisture estimation. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004 IEEE International, 2, 800-802. doi: [10.1109/IGARSS.2004.1368525](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2004.1368525).
- Kussul, N., Lemoine, G., Gallego, F. J., Skakun, S. V., Lavreniuk, M. y Shelestov, A. Y. (2016). Parcel-based crop classification in Ukraine using Landsat-8 data and Sentinel-1A. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(6), 2500-2508 doi: [10.1109/JSTARS.2016.2560141](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2560141).
- Lasko, K., Vadrevu, K. P., Tran, V. T. y Justice, C. (2018). Mapping double and single crop paddy rice with Sentinel-1A at varying spatial scales and polarizations in Hanoi, Vietnam. *IEEEJ. Select. Topics Appl. Earth Observ. Rem. Sens.*, 11(2), 498-512. doi: [10.1109/JSTARS.2017.2784784](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2784784).
- Luo, Y. y Flett, D. (2018). Sentinel-1 Data Border Noise Removal and Seamless Synthetic Aperture Radar Mosaic Generation. *Proceedings*, 2(7), 330. <http://dx.doi.org/10.3390/ecrs-2-05143>.
- Mandal, D., Kumar, V., Bhattacharya, A., Rao, Y. S., Siqueira, P. y Bera, S. (2018). Sen4Rice: a processing chain for differentiating early and late transplanted rice using timeseries Sentinel-1 SAR data with Google Earth engine. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 15(12), 1947-1951. doi: [10.1109/LGRS.2018.2865816](https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2865816).

- Mandal, D., Kumar, V., Ratha, D., Dey, S., Bhattacharya, A., López-Sánchez, J., McNairn, H. y Rao, Y. (2020a). Dual polarimetric radar vegetation index for crop growth monitoring using sentinel-1 SAR data. *Remote Sensing of Environment*, 247, 111954. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111954>.
- Mandal, D., Ratha, D., Bhattacharya, A., Kumar, V., McNairn, H., Rao, Y. S., Frery, A. C. (2020b). A radar vegetation index for crop monitoring using compact polarimetric sar data. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2976661>.
- Meyer, F. (2018). Spaceborne Synthetic Aperture Radar-Principles, Data Access, and Basic Processing Techniques. SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation. Eds. Flores, A., Herndon, K., Thapa, R., Cherrington, E. NASA. 2019. doi: [10.25966/ez4f-mg98](https://doi.org/10.25966/ez4f-mg98).
- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., y Papathanassiou, K. P. (2013). A Tutorial on Synthetic Aperture Radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine (GRSM)*, 1, 6-43. doi: [10.1109/MGRS.2013.2248301](https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2248301).
- Nelson, A., Setiyono, T., Rala, A., Quicho, E., Raviz, J., Abonete, P., Mau-nahan, A., Garcia, C., Bhatti, H., Villano, L., Thongbai, P., Holecz, F., Barbieri, M., Collivignarelli, F., Gatti, E., Quilang, E., Mabalay, M., Mabalot, P., Barroga, M ... y Ninh, N. H. (2014). Towards an operational SAR-based rice monitoring system in Asia: examples from 13 demonstration sites across Asia in the RIICE project. *Remote Sens*, 6 (11), 10773-10812. <https://doi.org/10.3390/rs61110773>.
- Nguyen, D. B., Gruber, A. y Wagner, W. (2016). Mapping rice extent and cropping scheme in the Mekong Delta using Sentinel-1A data. *Remote Sensing Letters*, 7 (12), 1209-1218. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2016.1225172>.
- Pedroni, L. (2003). Improved classification of Landsat Thematic Mapper data using modified prior probabilities in large and complex landscapes. *International Journal of Remote Sensing*, 24(1), 91-113. <https://doi.org/10.1080/01431160304998>.

- Reiche, J., Souza, C. M., Hoekman, D. H., Verbesselt, J., Persaud, H. y Herold, M. (2013). Feature level fusion of multi-temporal alos palsar and landsat data for mapping and monitoring of tropical deforestation and forest degradation. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 6(5), 2159-2173. doi: [10.1109/JSTARS.2013.2245101](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2245101)
- Rojas, N. (2011). *Cuencas hidrográficas de Costa Rica. Análisis biofísico, climatológico y socioeconómico*. Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica.
- Shen, W., Li, M., Huang, C., Tao, X., Li, S. y Wei, A. (2019). Mapping annual forest change due to afforestation in Guangdong Province of China using active and passive remote sensing data. *Remote Sensing*, 11(5), 1-21. <https://doi.org/10.3390/rs11050490>.
- Shimada, M., Itoh, T., Motohka, T., Watanabe, M., Shiraishi, T., Thapa, R. y Lucas, R. (2014). New global forest/non-forest maps from ALOS PALSAR data (2007–2010). *Remote Sensing of Environment*, 155. doi: [10.1016/j.rse.2014.04.014](https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.014).
- Singha, M., Dong, J., Zhang, G. y Xiao, X. (2019). High resolution paddy rice maps in cloudprone Bangladesh and Northeast India using Sentinel-1 data. *Scientific Data*, 6(1), 26. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0036-3>.
- Sinha, S., Jeganathan, C., Sharma, L. K. y Nathawat, M. S. (2015). A review of radar remote sensing for biomass estimation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12, 1779-1792. doi: [10.1007/s13762-015-0750-0](https://doi.org/10.1007/s13762-015-0750-0).
- Small, D. (2011). Flattening Gamma: Radiometric Terrain Correction for SAR Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49, 3081-3093. doi: [10.1109/TGRS.2011.2120616](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2120616).
- Song, Y. S., Sohn, H. G. y Park, C. H. (2007). Efficient Water Area Classification Using Radarsat-1 SAR Imagery in a High Relief Mountainous Environment. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(3), 285-296. <https://doi.org/10.14358/PERS.73.3.285>.
- Van Tricht, K., Gobin, A., Gilliams, S. y Piccard, I. (2018). Synergistic use of radar Sentinel-1 and optical Sentinel-2 imagery for crop mapping: a case study for Belgium. *Remote Sens*, 10(10), 1642. doi: [10.3390/rs10101642](https://doi.org/10.3390/rs10101642).

- Verhoeve, J. y De Wulf, R. (1999). An image processing chain for land-cover classification using multitemporal ERS-1 data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65(10), 1179-1186.
- Whelen, T. y Siqueira, P. (2018). Time-series classification of Sentinel-1 agricultural data over North Dakota. *Rem. Sens. Lett.*, 9(5), 411-420. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2018.1430393>.

