

Detección de estrés hídrico en brocoli (*brassica oleracea* var. *itálica*), utilizando *ndvi* sobre imágenes *multiespectrales* capturadas a corta distancia

*Detection of water stress in brocoli (*brassica oleracea* var. *itálica*), using *ndvi* on multispectral images captured at short distance*

<https://doi.org/10.5281/zenodo.4421593>

AUTORES: Nancy Quito^{1*}
Eduardo Tacuri²
Mateo López³
Lucia Lupercio⁴

DIRECCIÓN PARA CORRESPONDENCIA: * lucia.lupercio@ucuenca.edu.ec

Fecha de recepción: 14 / 09 / 2020

Fecha de aceptación: 28 / 12 / 2020

RESUMEN.

La respuesta espectral de la vegetación proporciona valiosa información sobre sus características biofísicas y fisiológicas. El objetivo fue detectar estrés hídrico durante el desarrollo foliar del brócoli, mediante el cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) sobre imágenes multiespectrales (RED, NIR), capturadas a corta distancia (pixel de 2,4mm) con el fin de proporcionar una herramienta alternativa, que no sacrifique el cultivo y permita la toma de decisiones más oportuna. Se realizó la captura de imágenes multiespectrales, de 120 plantas sometidas a estrés hídrico instantáneo, aplicando diferentes dosis de riego: T1-Anegamiento, T2, T3 y T4 a 25-50-75% respectivamente, en referencia a la Capacidad de campo y T5-Testigo; durante trece días, en dos periodos: 45 y 75 días después del trasplante. De forma paralela se registró variables fisiológicas como: conductancia estomática y contenido relativo de agua. Se calculó el NDVI. Se validaron los hallazgos comparando el NDVI con la conductancia estomática y contenido relativo de agua. Los resultados fueron estadísticamente

¹Ingeniera Agrónoma. Laboratorio de Geomática. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad de Cuenca.

²Magister en manejo comunitario de Recursos Naturales. Laboratorio de Geomática. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad de Cuenca.

³Ingeniero Agrónomo. Laboratorio de Geomática. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad de Cuenca.

⁴Doctora en Sistemas de información Geográfica. Laboratorio de Geomática. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad de Cuenca.

significativos con nivel de confianza $P=0,05$, para el periodo de 45 días se determinó valores fuertes de correlación ($R=0,71$) comparando el NDVI con las variables fisiológicas; a diferencia del periodo de 75 días, se obtuvo valores de R débiles e inferiores a 0,45. Este estudio permitió profundizar en el conocimiento de la respuesta espectral del cultivo de brócoli en su desarrollo vegetativo. Además, muestra la utilidad del NDVI a escala de parcela, como un enfoque rápido, alternativo y no destructivo para estimar estrés hídrico en cultivos para decisiones más oportunas.

Palabras clave: Agricultura de precisión, brócoli, estrés hídrico, imágenes multiespectrales, NDVI

ABSTRACT.

The spectral response of the vegetation provides valuable information on its biophysical and physiological characteristics. The objective was to detect water stress during broccoli foliar development, by calculating the normalized difference vegetation index (NDVI) on multispectral images (RED, NIR), captured at a short distance (2,4mm pixel) in order to provide an alternative tool that does not sacrifice the crop and allows more timely decision making. Multispectral images were captured of 120 plants subjected to instantaneous water stress, applying different irrigation doses: T1-Anegamiento, T2, T3 and T4 at 25-50-75% respectively, in reference to the Field Capacity and T5-Control; for thirteen days, in two periods: 45 and 75 days after transplantation. In parallel, physiological variables such as: stomatal conductance and relative water content were recorded. The NDVI was calculated. Findings were validated by comparing NDVI with stomatal conductance and relative water content. The results were statistically significant with a confidence level $P = 0,05$, for the 45-day period, strong correlation values $R = 0,71$ were determined when comparing the NDVI with the physiological variables; Unlike the 75-day period, R values are weak and less than 0,45. This study allowed to deepen in the knowledge of the spectral response of the broccoli crop in its vegetative development. In addition, it shows the utility of the NDVI at the plot scale, as a rapid, alternative and non-destructive approach to estimate water stress in crops for more timely decisions.

Keywords: Precision agriculture, broccoli, water stress, multispectral imaging, NDVI.

INTRODUCCION

Las hortalizas, frutales y cereales cumplen un rol esencial en la dieta alimenticia de las personas (Mayorga, Roldan, & Uvidia, 2019). Por otra parte, en el Ecuador, una de las actividades más importantes es la agricultura y particularmente, la producción de hortalizas es la base económica de pequeños y medianos productores. En la región sierra, según datos de la Encuesta de Superficie Agropecuaria Continua (ESPAC, 2018), hortalizas como el brócoli ocupan el 1,2% de la superficie total sembrada, en conjunto con los principales cultivos transitorios, de los cuales solo el 32,52% posee riego (ESPAC, 2017). Otro aspecto relevante para el productor ecuatoriano es el incremento de la aceptación del brócoli en mercados externos, es así que, en enero del 2018 generó 53 millones USD con una participación de 0,84% del grupo de los productos de exportación no petroleros (PROEcuador, 2018).

En este contexto, es fundamental realizar la supervisión constante del cultivo de brócoli debido a la susceptibilidad que éste tiene al estrés, independientemente del medio en el que se encuentre establecido. El estrés hídrico, es un factor abiótico, que podría llegar a comprometer la productividad del cultivo; y es una situación que tiene tendencia al aumento debido a cambios ambientales, esto que conlleva también a complicaciones socio económicas (Rodríguez y Guevara, 2017), de aquí también la importancia de su control y monitoreo constante.

Para realizar una supervisión continua del cultivo se pueden usar diversos métodos entre ellos: la extracción del peso seco y fresco (Martín, Dell'Amico, & Cañizares, 2018); el contenido relativo de agua (Suárez et al., 2015); el número de hojas; la altura de la planta; el área foliar; el color de las hojas; el contenido relativo en clorofila; y el peso fresco y seco de las raíces (Niñirola, Nicola, Pignata, Gilabert, & Fernández, 2014). Otro enfoque más actual, es aprovechar los beneficios que ofrece la teledetección, particularmente la respuesta espectral del cultivo, que posibilita el cálculo de índices de vegetación (IV). Los IV permiten discriminar la presencia o ausencia de vegetación, así como también permiten distinguir lo saludable y lo estresado del cultivo (Assamann, Kerby, Cunliffe, y Smith, 2018). El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), ha sido ampliamente utilizado, por ejemplo en el análisis de la variabilidad agronómica a partir de imágenes (Díaz, 2015); en análisis de la evolución temporal y espacial de la dinámica vegetal sobre diferentes coberturas de suelo con series temporales de NDVIs (Alatorre,

Beguería, & Serrano, 2010); en cultivos como la caña para evaluar el estado de salud, para determinar el estrés (Águilar, Galindo, Fortanelli, & Contreras, 2010).

La respuesta espectral permite identificar características de la vegetación y problemas en el cultivo de manera viable pues permite optimizar el desarrollo de los sistemas productivos (Berrío, Mosquera, & Alzate, 2015). En el ámbito del estrés abiótico se considera una buena estrategia el uso de imágenes multiespectrales. Castillo (2019), realizó el análisis del estrés hídrico del cultivo de palta para optimizar el uso de los recursos hídricos (Castillo, 2019). Incluso, con imágenes multiespectrales satelitales es posible obtener datos aproximados y referenciales de NDVI que permiten incrementar la producción de cultivos como la tuna implementando de riego por goteo (Erazo & Sevilla, 2019). El insumo principal para varios de estos estudios son las imágenes multiespectrales provenientes de satélites, fotografía aérea, etc. es decir imágenes con diferente tamaño de pixel. Más recientemente, gracias a la disponibilidad cada vez mayor de sensores multiespectrales y de los vehículos aéreos tripulados remotamente por humanos (VATR), con capacidades para operar a distancias muy cortas; es posible obtener imágenes con muy alta resolución espacial (tamaño de pixel en el orden de centímetros). Estas tecnologías están facilitando cada vez más aplicaciones en la agricultura de precisión.

Es de mencionar que las imágenes capturadas a cortas distancias, es decir imágenes multiespectrales de alta resolución espacial, cambia el paradigma de las técnicas espectrales tradicionales en cuanto a su análisis y procesamiento, pues el procesamiento de imágenes a nivel de píxeles individuales, conllevan hacia la determinación de la información en fracciones, de tal forma que se discrimine diferentes superficies como vegetación y suelo. De hecho aplicaciones de detección remota, para indicadores de estrés hídrico realizan estos análisis con técnicas de estudio en hojas individuales (Jones y col., 2009).

El trabajo que se presenta en este documento hace uso del NDVI sobre imágenes multiespectrales capturadas a corta distancia (pixel de 2,4mm) para identificar estrés hídrico sobre el cultivo de brócoli, en su etapa de desarrollo foliar. A través del uso de este método se trata de proporcionar una herramienta alternativa, que no sacrifique el cultivo (como si sucede con otros métodos).

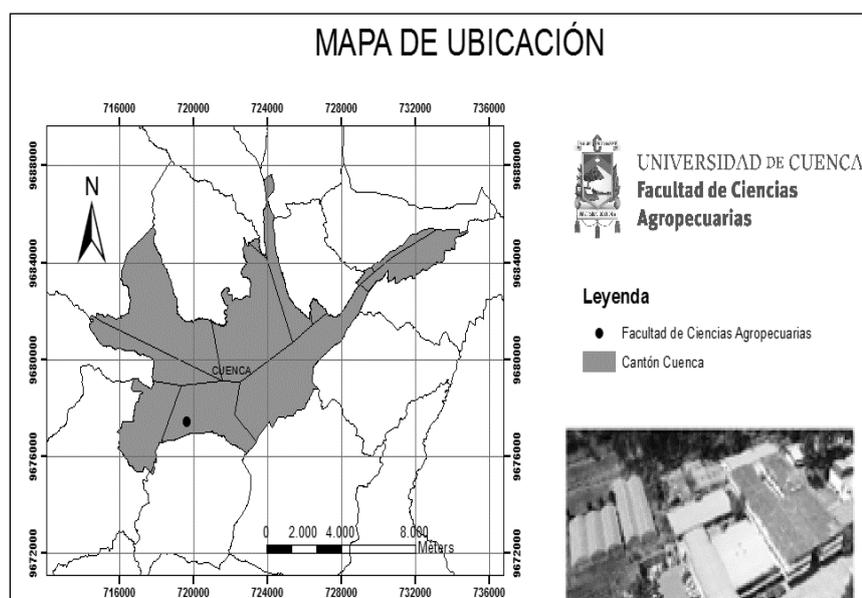
En las secciones siguientes se presentan: los materiales y métodos, en donde se describe el procesamiento de las imágenes discriminando únicamente la vegetación; los resultados y discusión; y las conclusiones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de estudio

El estudio fue realizado sobre invernadero, ubicado en Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador; a una altura de 2562 m.s.n.m. y en las coordenadas (UTM WGS84) siguientes; X: 719596.30 Y:9677058.14

Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio en donde se llevó a cabo el experimento.



Fuente: los autores.

Arreglo en campo y manejo: El ensayo se realizó en la etapa de desarrollo foliar del brócoli en dos periodos diferentes: 45 y 75 Días Después del Trasplante (DDT), esta etapa es considerada de mayor consumo de riego por parte del cultivo. En ambos períodos se aplicó el estrés hídrico instantáneo durante trece días. Se utilizaron parcelas de 3m² para cada tratamiento y las repeticiones fueron mini parcelas de 1 m².

La siembra se realizó con 120 plántulas de brócoli en fundas negras de plástico rellenas de sustrato compuesto por 75% tierra y 25% bocashi como materia orgánica y se colocaron en el invernadero con distancias de 0.3 cm x 0.4 cm. Las plantas ya sembradas se colocaron dentro de un área de referencia de 1 m² colocando cuatro plantas dentro de estos marcos de referencia. Dentro del manejo agronómico se realizó la debida fertilización y manejo de plagas de acuerdo monitoreo continuo del cultivo.

Muestreo en campo: Se realizó un muestreo de variables fisiológicas como conductancia estomática y contenido relativo de agua, para los dos períodos estudiados 45 y 75 días

después del trasplante, y de forma paralela se realizó la captura de imágenes multiespectrales.

Captura de imágenes multiespectrales: Si bien en el ensayo fue bajo invernadero, para la captura las imágenes multiespectrales se aprovechó una ventana de luz en el techo del invernadero, es decir se tomaron las imágenes bajo influencia directa de la radiación solar, al medio día. Se utilizó el sensor Parrot Sequoia⁵, ubicándolo a una altura de 2 metros. Las tomas fueron en cada estado fenológico estudiado, para cada unidad experimental, según su tratamiento y sus repeticiones. De aquí se obtuvieron un conjunto de imágenes separadas por bandas, es decir de cada captura 4 bandas espectrales (4 archivos)

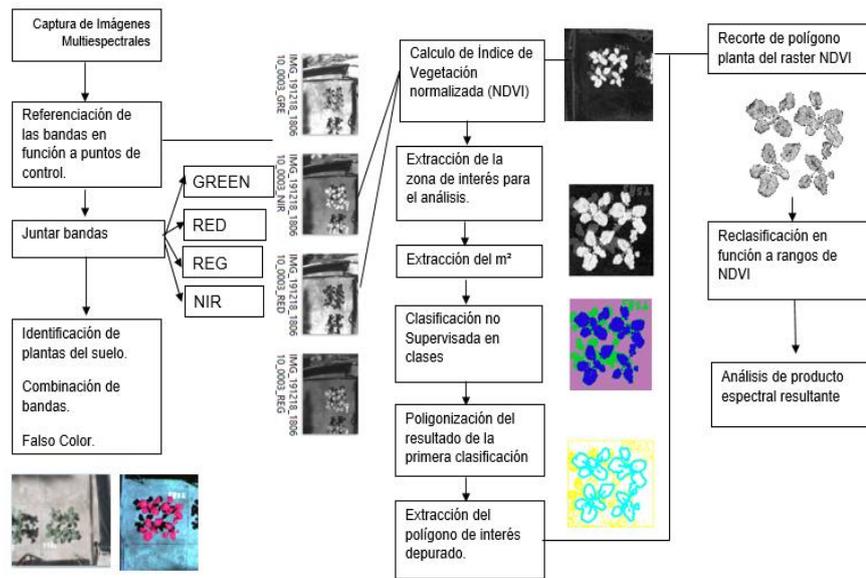
Procesamiento de imágenes multiespectrales: Se realizó el procesado de imágenes y cálculo del NDVI, para cada una de las unidades experimentales según el esquema en la figura 2. En lo referente al procesamiento, se realizó la combinación de bandas, homogenizando previamente el tamaño de pixel y la referencia espacial de todas las bandas. Esta referenciación de imágenes se asemeja a una georreferenciación, debido a que se estableció un marco fotoidentificable con medidas establecidas en una proyección arbitraria que representan 1 m². Este proceso se lo llevó acabo en un software SIG.

Se procede al cálculo del NDVI, sin embargo, se observó claramente que existen pixeles que no corresponden a vegetación, por lo que fue necesario un procesamiento adicional para aislar únicamente los pixeles de interés. Para esto, se realizó análisis falso color y clasificación no supervisada para cuantificar e identificar el número de pixeles que corresponden a vegetación y cuantos no, obteniendo como resultado polígono que muestra el límite foliar sobre las imágenes. Este polígono sirvió como máscara de recorte para los archivos resultados del NDVI. Finalmente se procedió con reclasificaciones para cuantificar el número de pixeles sanos y enfermos según los rangos de NDVI analizados.

Este proceso se lo realiza para cada grupo de imágenes capturadas en cada uno de sus tratamientos y en cada una de sus repeticiones. Obteniendo tablas de datos a ser analizados estadísticamente para determinar su comportamiento

⁵ <https://www.parrot.com/en/shop/accessories-spare-parts/other-drones/sequoia>

Figura 2. Esquema de procesamiento de imágenes multiespectrales



Fuente: los autores.

Criterio para el NDVI: Se realizó el análisis del NDVI en función a los pixeles saludables y estresados encontrados en las imágenes multiespectrales para lo cual se consideró valores en la clasificación mostrados en la tabla 1, según recomendaciones de algunos autores como Ballari et al., (2015) y Kharuf, Hernández, Orozco, Aday, & Mora, (2018).

Tabla 1: Determinación de rangos de NDVI para la clasificación final.

	Rango	Descripción
Bajo	0,0 - 0,4	Vegetación Estresada
Alto	0,4 - 0,9	Vegetación Saludable

Fuente: los autores.

Análisis estadístico: Se realizó ANOVAS para comparar el efecto de los tratamientos en las plantas de brócoli reflejado en el NDVI y un análisis de correlación de Pearson con un nivel de confianza $p=0.05$ para determinar la relación entre el contenido relativo de agua y conductancia estomática de las plantas de brócoli con el NDVI.

Tratamientos del experimento: Las plantas se mantuvieron bajo óptimas condiciones de riego hasta los períodos de aplicación de estrés, es decir los: 45 y 75 DDT. Se destinó

60 plantas para cada período pues el estrés de los tratamientos conllevó el riesgo de muerte. Se induce el estrés hídrico instantáneo durante trece días bajo los siguientes tratamientos: T1 (anegamiento), T2, T3, T4 (25%, 50% y 75% en referencia de la CC respectivamente), y T5 (Testigo) los cuales corresponden a las siguientes dosis de riego: >0.52 L/p (T1), 0.13 L/p (T2), 0.26 L/p (T3), 0.39 L/p (T4) y 0.52 L/p (T5-Testigo) como se visualiza en la Tabla 2. El riego fue aplicado manualmente y se mantuvo bajo el invernadero con el objeto de mantener el control y evitar la influencia de otros aportes hídricos.

Tabla 2. Descripción de cada tratamiento y la dosis de agua calculada para cada uno.

T	% en ref. a CC	Ln (mm)	Vol./Día (l/m ²)	MP	Litros/planta/día
1	Anegamiento	-	-	0,12	>0.52
2	25	7,25	1,04	0,12	0,13
3	50	15	2,16	0,12	0,26
4	75	22,5	3,24	0,12	0,39
Testigo (5)	100	30	4,32	0,12	0,52

Fuente: los autores.

VARIABLES DE RESPUESTA:

- Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) a partir de imágenes captadas con un sensor multiespectral Parrot Sequoia.
- Contenido Relativo de Agua (CRA) de las plantas, con la utilización de la metodología sugerida por (Vila, 2011) expresado en porcentaje.
- Conductancia estomática (CE) de las hojas de las plantas con un equipo denominado porómetro Decagon Devices, INC.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis del NDVI de imágenes multiespectrales para el periodo de 45 DDT

Al analizar los resultados del procesamiento de imágenes multiespectrales para el período de 45 DDT, el análisis del NDVI que se muestra en la tabla 3 determinó para el T1 (Anegamiento) el porcentaje más alto de píxeles estresados 52,78% y en consecuencia el

porcentaje de pixeles saludables más bajo debido al estrés por anegamiento las plantas pequeñas perecen con mayor facilidad. Se evidenció un marchitamiento y posterior muerte de las hojas como indica Pardos, (2004) pues se presentaron diferencias significativas (P=0,0022) respecto al tratamiento testigo T5 que tuvo el porcentaje más bajo de pixeles estresados (12,05%) como se visualiza en la figura 3.

Los demás tratamientos presentaron los siguientes porcentajes de NDVI, para pixeles estresados T4 (31,70%), T3 (38,75%) y T2 (42,54%) que corresponden a los tratamientos de déficit hídrico resultaron diferentes al Testigo, hecho que concuerda con lo obtenido por Shikha et al.,(2007) en donde se determinó diferencias significativas entre los valores del IV por la baja aplicación de agua y nitrógeno al obtener valores bajos de NDVI en comparación con el testigo.

Tabla 3: Comparación de porcentajes de NDVI entre tratamientos a los 45 DDT.

Tratamientos	Dosis de riego (L/p)	NDVI				
		Saludable (%)	Estresado (%)			
1	Anegamiento	>0,52	47,22	A	52,78	C
2	25%	0,13	57,46	AB	42,54	BC
3	50%	0,26	61,25	AB	38,75	BC
4	75%	0,39	68,30	B	31,70	B
Testigo	100%	0,52	87,95	C	12,05	A

(5)

Fuente: los autores.

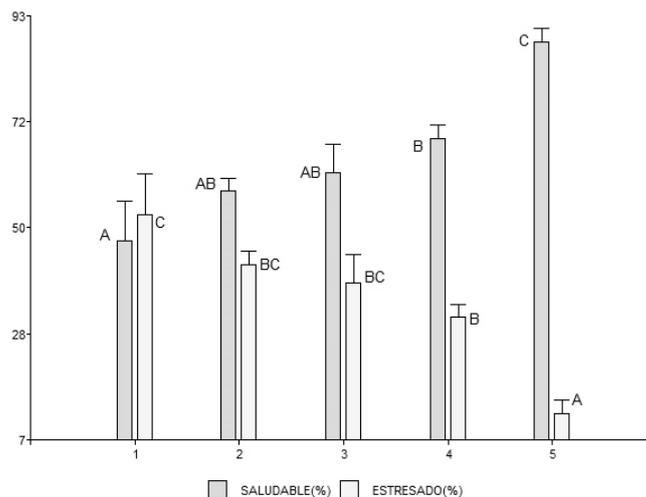


Figura 3. Comportamiento de NDVI para los tratamientos a los 45 DDT.

Fuente: Los autores.

Análisis del NDVI de imágenes multiespectrales para el periodo de 75 DDT

En los resultados del procesamiento de imágenes multiespectrales para las plantas de brócoli de 75 DDT el análisis de NDVI mostró diferencias significativas ($P= 0,0204$), el T2 como se muestra en la tabla 4 al cual se le aplicó apenas 0,13 litros de agua por planta (25% en referencia a la CC), obtuvo el más alto porcentaje de pixeles estresados (62,19%) en comparación a los demás tratamientos. Este resultado demuestra que en plantas de 75 DDT y bajo estas condiciones, el estrés hídrico más evidente fue por falta de agua más no por el exceso (anegamiento) pues no se encontró diferencias estadísticamente significativas de los otros tratamientos con el testigo a excepción del T2. Esto posiblemente debido a que el estrés hídrico instantáneo en la etapa de los 75 DDT no fue tan severo como en plantas de 45 DDT pues el efecto del estrés depende de la duración, el periodo en el que se presente y a la influencia otros factores; ambientales, fisiológicos como el estado de la raíz y/o cutícula (Tafolla, González, Tiznado, & Zacarías, 2013). Hechos que permiten tener una idea del comportamiento del estrés en las plantas de brócoli de 75 DDT. Cabe recalcar el hecho de haber demostrado diferencias estadísticamente significativas de al menos un tratamiento (T2) frente al testigo es un punto que permitió diferenciar el tratamiento de estrés por déficit hídrico como se visualiza en la figura 4. Bautista et al.,(2018) al igual que en este trabajo, muestra que mediante el análisis de imágenes multiespectrales se puede detectar el estrés en el cultivo de brócoli de doce semanas.

Tabla 4: Comparación de porcentajes de NDVI entre tratamientos a los 75 DDT.

Tratamientos	Dosis de riego (L/p)	NDVI	
		Saludable (%)	Estresado (%)
1 Anegamiento	>0,52	74,45	25,55
2 25%	0,13	37,81	62,19
3 50%	0,26	56,90	43,10
4 75%	0,39	71,63	28,37
Testigo (5) 100%	0,52	77,92	22,08

Fuente: los autores.

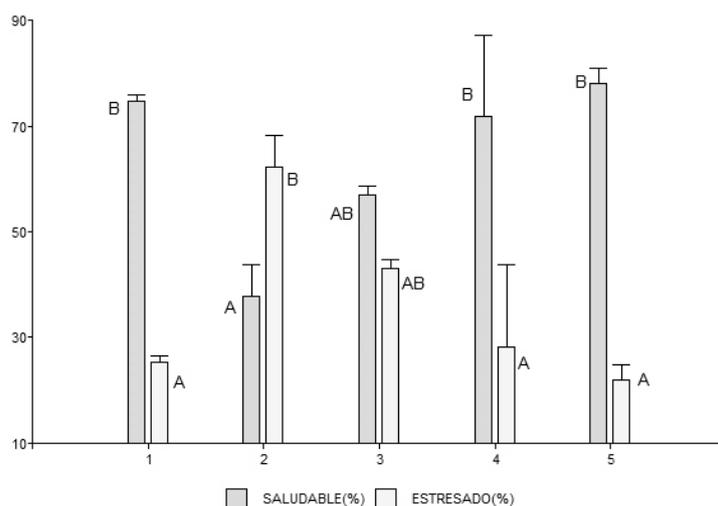


Figura 4. Comportamiento de NDVI para los tratamientos a los 75 DDT.

Fuente: Los autores.

Análisis del área de cobertura de las imágenes multiespectrales

Anteriormente se describió como se expresan diferentes niveles de estrés hídrico en el NDVI de las plantas y para complementar el análisis se determinó el área de cobertura de las plantas dentro de un marco de referencia de 1 m² a partir de las imágenes, se encontró diferencias significativas $P < 0,0001$ entre tratamientos como se visualiza en la tabla 5 por lo cual se determinó para el anegamiento (T1) el porcentaje más bajo en referencia al área de cobertura (4,29%), este bajo valor nos permite afirmar que el estrés hídrico generado a etapas tempranas del cultivo de brócoli se comporta de manera severa provocando la disminución de su crecimiento y desarrollo del mismo modo los tratamientos por déficit hídrico (T2, T3 y T4) al final se determinó que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes al testigo (T5).

Tabla 5: Comparación de áreas de cobertura para ambos periodos de estudio.

Tratamientos	Dosis de riego (L/p)	Área de cobertura (%)		
		45DDT	75DDT	
1 Anegamiento	>0,52	4,29	20,11	A
2 25% de CC	0,13	8,27	27,80	AB
3 50% de CC	0,26	10,27	35,19	B
4 75% de CC	0,39	11,50	35,99	B
5 Testigo	0,52	25,28	91,45	C

Fuente: los autores.

Del mismo modo se analizó el área de cobertura para plantas de 75 DDT en donde se determinó un área de cobertura mínimo para T1 Anegamiento (20,11%) este valor es el más bajo respecto a los tratamientos T2, T3 y T4, sin embargo, todos estos tratamientos si son diferentes significativamente ($P=0,0001$) del Testigo (T5) en el cual se obtiene una cobertura casi total del área de referencia (91,45%). Si bien los diferentes niveles de estrés no se evidenciaron en gran medida en el NDVI, si se visualizó la reducción en el desarrollo y crecimiento de los tratamientos.

El efecto del estrés hídrico para ambos periodos estudiados (45 y 75 DDT), se visualizó con una disminución progresiva del área de cobertura y en el caso del anegamiento un efecto más marcado por la severidad del estrés, lo cual permite corroborar estos resultados con lo mencionado por Hossain & Mohona, (2018) en donde afirma que el estrés hídrico provoca menor masa foliar y altura retrasando su desarrollo echo evidente según los resultados obtenidos, lo cual permite afirmar que los índices de vegetación se relacionan más estrechamente con variables que involucran el desarrollo de las plantas (Mamani et al., 2019) .

Análisis de correlaciones entre NDVI y respuestas fisiológicas

Se determinó que tipo de relación se presenta entre el NDVI y las respuestas fisiológicas como lo es conductancia estomática (CE) y el contenido relativo de agua (CRA) mediante correlaciones de Pearson con un p valor de 0,05.

Se encontraron correlaciones fuertes en el análisis de plantas de 45 DDT en comparación con las de 75 DDT. Al analizar la correlación entre NDVI (píxeles estresados) y conductancia estomática se obtuvo un valor de $R = -0,82$ ($P=0,0002$) indicando que representa una correlación negativa inversa como se muestra en la figura 5, es decir que a mayor cantidad de píxeles estresados que se encontró en las imágenes de los diferentes tratamientos, menor fue el valor de la conductancia estomática esto concuerda con el estudio realizado por Kałużewicz, Krzesiński, Spizewski, & Zaworska, (2017) donde mencionan que bajo condiciones de estrés hídrico las plantas de brócoli reducen la CE con el objeto de tener un efecto ahorrador y de mejor eficiencia en el uso del agua disponible. Además Espinoza, Khot, Sankaran, & Jacoby, (2017) mediante sus estudios determinaron una relación similar entre conductancia estomática y un alto nivel de riego en el testigo para plantas de uva y esto a su vez reflejado en el NDVI, caso que concuerda con este estudio en el que se encontró la relación no solo por bajas cantidades de agua

sino también por exceso. Como se puede observar el comportamiento de la nube de puntos de la figura 6, no se logró determinar correlaciones fuertes en el caso de las plantas de 75 DDT entre conductancia estomatica y NDVI pues este valor resulto debil puesto a que fue $R = 0,45$ resultando estadísticamente no significativo, esta situación se debe a que en este periodo de inducción de estrés hídrico instantáneo no resultó con la misma severidad que el plantas de 45 DDT pues el efecto del estrés depende de la duración, el periodo en el que se presente y a la influencia otros factores; ambientales, fisiológicos como el estado de la raíz y/o cutícula (Tafolla et al., 2013), hechos que explicarían el efecto resultado de plantas de 75DDT.

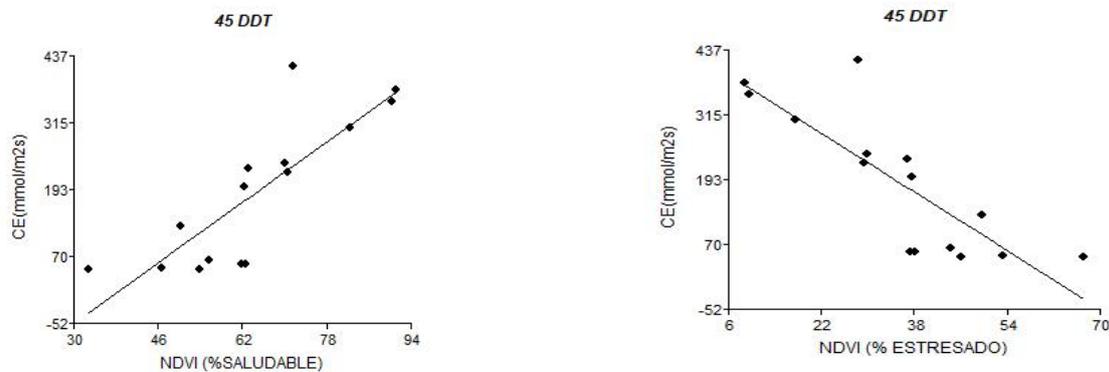


Figura 5. Distribución de la nube de puntos para la correlación entre NDVI y CE en plantas de 45 DDT.

Fuente: los autores.

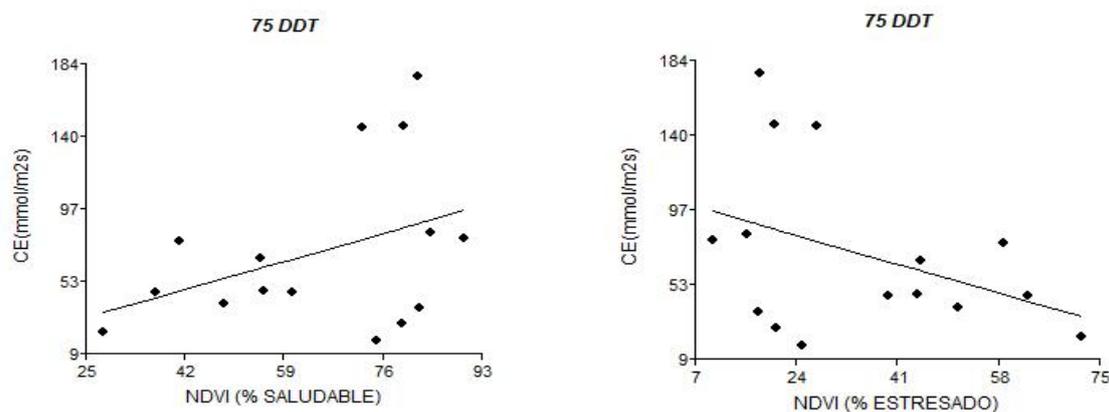


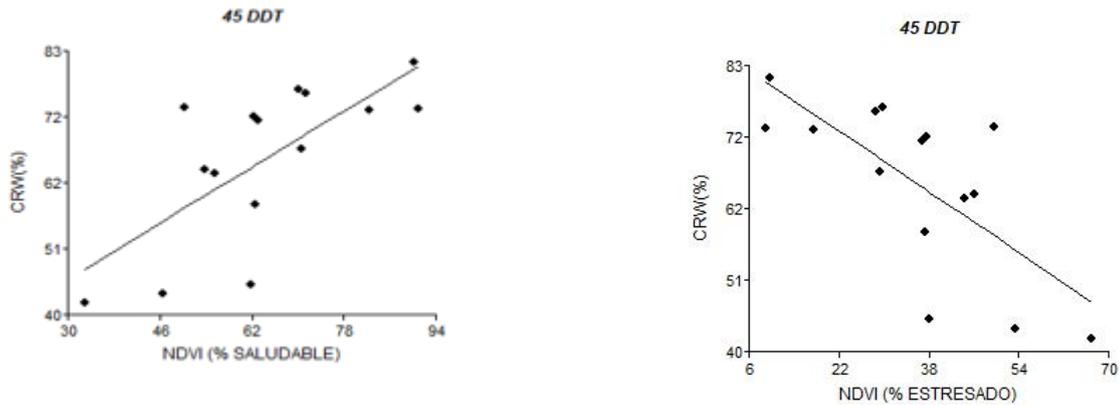
Figura 6. Distribución de la nube de puntos para la correlación entre NDVI y CE en plantas de 75 DDT.

Fuente: los autores.

En el caso del análisis de correlación entre Contenido Relativo de Agua y NDVI (píxeles saludables) se obtuvo un valor de $R = 0,71$ y una significancia de $P = 0,0032$ lo cual indica una relación positiva como se muestra en la figura 7, es decir que al encontrar una mayor cantidad de píxeles saludables en las imágenes mayor fue el CRA. En el caso del NDVI

(pixeles estresados) presentaron un valor $R = -0,71$ ($P=0,0032$), lo que indica un comportamiento inverso es decir se encontró un menor valor del CRA frente a un mayor porcentaje de pixeles estresados.

Estos resultados se corroboran con el hecho de que en la región del infrarrojo medio, el contenido de agua de la hoja es el principal determinante de la reflectancia (Danson,



Steven, Malthus, & Clark, 2007). Los resultados para el periodo de 75 DDT fue de una correlación débil $R=0,32$ lo cual no fue estadísticamente significativo como se muestra en la figura 8, situación que se debe al efecto ante el estrés hídrico inducido en este periodo.

Figura 7. Distribución de la nube de puntos para la correlación entre NDVI y CRA en plantas de 45 DDT.

Fuente: Los autores.

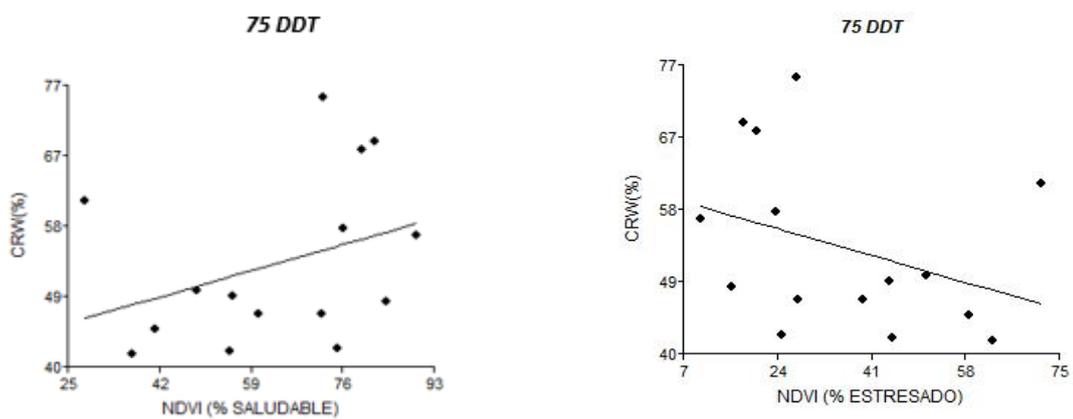


Figura 8. Distribución de la nube de puntos para la correlación entre NDVI y CRA en plantas de 75 DDT.

Fuente: Los autores.

Lo analizado anteriormente permitió conocer cómo se correlacionaron las variables fisiológicas de las plantas de brócoli con el NDVI tanto para pixeles saludables como estresados para plantas de 45 DDT, sin embargo, para el análisis de las plantas de 75 DDT no se logró encontrar correlaciones esta situación se debe al efecto que el estrés hídrico tuvo en las plantas de este periodo como se resume en la tabla 6.

En los resultados de este experimento se evidencia la relación entre el NDVI y el CRA, confirmando lo mencionado por Gilabert et al., (2010) en donde se dice que independientemente del factor ya sea interno o externo que llegue a tener efectos en el contenido de sustancias y estructura interna de las hojas afectará su reflectancia, entre los factores principales están: edad, tensiones ambientales, minerales, etc. Echo que podría explicar la influencia de la edad en el efecto de los tratamientos en plantas grandes (75 DDT) de brócoli.

En base a estos resultados obtenidos en este estudio queda demostrada la utilidad de las características espectrales de las hojas para evaluar el estrés abiótico en cultivos (Ihuoma & Madramootoo, 2020). La medición por medio del uso potencial de índices de reflectancia espectral proporciona herramientas alternativas para rasgos medidos destructivamente además de tener un enfoque confiable para estimar el estrés de los cultivos (Hendawy et al., 2020).

Tabla. 6. Correlaciones obtenidas entre variables fisiológicas e Índice de vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

Relaciones entre variables			45DDT		75DDT	
			R	P	R	P
NDVI	(Píxeles saludables)-	Conductancia estomática.	0,82	0,0002	0,45	0,0953
NDVI	(Píxeles estresados)-	Conductancia estomática.	-0,82	0,0002	-0,45	0,0953
NDVI	(Píxeles saludables)-	Contenido Relativo de Agua.	0,71	0,0032	0,35	0,2008
NDVI	(Píxeles estresados)-	Contenido Relativo de Agua.	-0,71	0,0032	-0,35	0,2008

Fuente: los autores.

CONCLUSIONES

El estrés hídrico en plantas de brócoli en el periodo de los 45 DDT tiene efecto fuerte en el NDVI de la respuesta espectral en las imágenes.

El estrés hídrico en plantas de brócoli en el periodo de los 75 DDT tiene un efecto leve en el NDVI de la respuesta espectral en las imágenes.

El NDVI permitió determinar el estrés hídrico en plantas de brócoli a partir de imágenes a baja altura pues presenta valores de correlación asociados a variables de tipo fisiológico.

BIBLIOGRAFÍA

- Águilar, N., Galindo, G., Fortanelli, J., & Contreras, C. (2010). Índice normalizado de vegetación en caña de azúcar en la Huasteca Potosina. *Redalyc.Org*.
- Alatorre, L., Beguería, S., & Serrano, V. (2010). ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL NDVI SOBRE ÁREAS VEGETADAS Y ZONAS DE RIESGO DE EROSIÓN EN EL PIRINEO CENTRAL. *Pirineos-Revista de Ecología de Montaña*, 165, 7–27. <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2010.165001>
- Assamann, J., Kerby, J., Cunliffe, A., & Smith, I. (2018). Vegetation monitoring using multispectral sensors – best practices and lessons learned from high latitudes. *NRC Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 1–51. <https://doi.org/10.1139/juvs-2018-0018>
- Ballari, D., Acosta, E., Espinoza, Á., Orellana, D., Morocho, V., Martin, M., & Hardter, T. (2015). Análisis de imágenes UAV de las Islas Galápagos. *Reevista GEOESPACIAL*, 13. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/299283440_Analisis_de_imagenes_UAV_de_las_Islas_Galapagos
- Bautista, R., Constante, P., Gordon, A., & Mendoza, D. (2018). Diseño e implementación de un sistema de visión artificial para análisis de datos NDVI en imágenes espectrales de cultivos de brócoli obtenidos mediante una aeronave pilotada remotamente Design and implementation of an artificial vision system for NDVI da. *REVISTA INFOCIENCIA*, 12(Figura 1), 30–35.
- Berrío, V., Mosquera, J., & Alzate, D. (2015). Uso de drones para el analisis de imágenes multiespectrales en agricultura de precisión. *@LIMENTECH CIENCIA Y TECNOLOGÍA ALIMENTARIA*, (1), 28–40. <https://doi.org/https://doi.org/10.24054/16927125.v1.n1.2015.1647>

- Castillo, M. (2019). *Ánalisis de imágenes multiespectrales aéreas de una parcela de cultivo de palta. Universidad Nacional de San Antonio Abad Del Cusco*. Retrieved from <http://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/UNSAAC/4765>
- Danson, F., Steven, M., Malthus, T., & Clark, J. (2007). International Journal of Remote Sensing High-spectral resolution data for determining leaf water content. *Remote Sensing*, (April 2013), 37–41.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/01431169208904049>
- Díaz, J. (2015). Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. *UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID*, 78. Retrieved from http://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf
- Erazo, A., & Sevilla, H. (2019). Estudio multiespectral del cultivo de tuna para determinar SENTINEL 2A , en el cantón Guano , provincia de Chimborazo , Ecuador, 55–66. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.29019/enfoque.v10n3.453>
- ESPAC. (2018). Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua. Retrieved from [http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2018/Presentacion de principales resultados.pdf](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2018/Presentacion_de_principales_resultados.pdf)
- Espinoza, C., Khot, R., Sankaran, S., & Jacoby, P. (2017). High Resolution Multispectral and Thermal Remote Sensing-Based Water Stress Assessment in Subsurface Irrigated Grapevines. *Remote Sensing*, 9,961.
<https://doi.org/10.3390/rs9090961>
- Gilbert, M., González, P., & Martínez, B. (2010). *Theory and applications of vegetation indices* (Vol. 661). Kerala.
- Hendawy, S., Suhaibani, N., Ashkar, I., Alotaibi, M., Tahir, M., Solieman, T., & Hassan, W. (2020). Combining Genetic Analysis and Multivariate Modeling to Evaluate Spectral Reflectance Indices as Indirect Selection Tools in Wheat Breeding under Water Deficit Stress Conditions. *Remote Sensing*.
<https://doi.org/10.3390/rs12091480>
- Hossain, M., & Mohona, M. (2018). Shoot-root traits of broccoli (Brassica oleracea var . italica L .) as influenced by different irrigation schedules. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 5(1), 11–18.
<https://doi.org/10.22059/ijhst.2018.256331.235>

- Ihuoma, S., & Madramootoo, C. (2020). Narrow-band reflectance indices for mapping the combined effects of water and nitrogen stress in field grown tomato crops. *Biosystems Engineering*, 192, 133–143.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.01.017>
- Jones, G., Serraj, R., Loveys, B., Xiong, L., Wheaton, A., & Price, A. (2009). Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. *Functional Plant Biology*, 978–989.
<https://doi.org/10.1071/FP09123>
- Kałużewicz, A., Krzesiński, W., Spizewski, T., & Zaworska, A. (2017). Effect of Biostimulants on Several Physiological Characteristics and Chlorophyll Content in Broccoli under Drought Stress and Re-watering. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 45(1), 197–202.
<https://doi.org/10.15835/nbha45110529>
- Kharuf, S., Hernández, L., Orozco, R., Aday, O., & Mora, I. (2018). Análisis de imágenes multiespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, XXXIX, 79–91.
Retrieved from <http://rielac.cujae.edu.cu/index.php/rieac/article/view/669/336>
- Mamani, J., Ramos, L., Ontiveros, R., Bustamante, W., & Porras, Z. (2019). Relación de la altura de planta del cultivo de arroz bajo estrés hídrico con índices de vegetación obtenidas de imágenes de dron. *COMEII-19043*. Retrieved from <http://www.comeii.com/comeii2019/docs/ponencias/extenso/COMEII-19043.pdf>
- Martín, R., Dell'Amico, J., & Cañizares, P. (2018). RESPUESTA DEL PASTO CAYMAN (*Brachiaria* híbrido cv . CIAT BRO2 / 1752) AL DÉFICIT HÍDRICO, 39(1), 113–118. Retrieved from <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v39n1/ctr15118.pdf>
- Mayorga, D., Roldan, M., & Uvidia, M. (2019). Uso del índice normalizado de vegetación para la elaboración de planos de cultivo. *Opuntia Brava*, 11, 261–265.
<https://doi.org/https://doi.org/10.35195/ob.v11i2.760>
- Montecé, F., Cadena, D., Alcívar, A., Caicedo, O., & Ruíz, I. (2020). TECNOLOGÍAS TIC ´ S PRODUCCIÓN AGROPECUARIA INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES (ICT) IN. *Journal of Science and Reserch*, 5, 134–144. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3927015>
- Niñirola, D., Nicola, S., Pignata, G., Gilabert, C., & Fernández, A. (2014). Efecto de las PGPR en la producción y vida útil del berro (*Nasturtium officinale*) cultivado en

- bandejas flotantes. *III Workshop En Investigación Agroalimentaria*, 135–138.
Retrieved from <https://repositorio.upct.es>
- Pardos, J. (2004). *Respuestas de las plantas al anegamiento del suelo Factores edáficos y climáticos*. Retrieved from [http://www.inia.es/gcontrec/pub/101-107-\(05\)-Respuestas_1162210193281.pdf](http://www.inia.es/gcontrec/pub/101-107-(05)-Respuestas_1162210193281.pdf)
- PROEQUADOR. (2018). Boletín Mensual de Inteligencia de Mercados. Retrieved from <https://www.proecuador.gob.ec/estudios-de-inteligencia-comercial/>
- Rodríguez, A., & Guevara, D. (2017). Comportamiento De La Conductancia Estomática De Dos Variedades De Tomate Cubanas En Condiciones De Campo Y Riego Limitado. *Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas*, 38(2), 137–144. Retrieved from <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v38n2/ctr200217.pdf>
- Shikha, D., Waller, P., Hunsaker, D., Clarke, T., & Barnes, E. (2007). Ground-based remote sensing for assessing water and nitrogen status of broccoli. *Agricultural Water Management*, 92(3), 183–193. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.05.020>
- Suárez, L., Fonseca, A., Fernandez, R., Infante, S., Castro, L., García, B., ... Arias, M. (2015). Efecto de la salinidad sobre el contenido relativo de agua y la concentración de pigmentos en tres genotipos de frijol (*Phaseolus vulgaris* L .). *Centro Agrícola*, 42(3), 19–24. Retrieved from <https://biblat.unam.mx/hevila/Centroagricola/2015/vol42/no3/3.pdf>
- Tafolla, J., González, A., Tiznado, M., & Zacarías, L. (2013). COMPOSICIÓN , FISILOGÍA Y BIOSÍNTESIS DE LA CUTÍCULA EN PLANTAS COMPOSITION , PHYSIOLOGY AND BIOSYNTHESIS OF PLANT CUTICLE. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(1), 3–12. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802013000100001&lng=es&tlng=en.
- Vila, H. (2011). *Regulación de la hidratación y la turgencia foliares por mecanismos evitadores del estrés, y resistencia a déficit hídrico en vid. Modelo vs. experimentos*. Retrieved from http://m.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/4367/vila-regulacionhidratacion.pdf