

MÉTODO NO DESTRUCTIVO PARA EVALUAR EL VIGOR VEGETAL EN ESPECIES FORESTALES CULTIVADAS EN VIVERO.

Héctor Alfredo López-Aguilar¹, José Luis García-Pérez¹, Eutiquio Barrientos-Juárez¹,
Jorge Alberto Gómez², Antonino Pérez-Hernández³.

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Carretera a Ojinaga kilómetro 33.3, Centro, 32910 Aldama, Chihuahua.

² Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Ave. del Charro 450, Partido Romero, 32310 Ciudad Juárez, Chihuahua.

³ Centro de Investigación en Materiales Avanzados. Ave. Miguel de Cervantes 120, Industrial Chihuahua, 31109 Chihuahua, Chihuahua.

E-mail: antonino.perez@cimav.edu.mx

INTRODUCCIÓN.

La medición de algunas características fisiológicas que reflejan el estado sanitario, nutricional e hídrico de las plantas empleadas para la reforestación, es costosa, debido al uso de instrumentos sofisticados, en comparación con los atributos morfológicos que se obtienen de manera directa (Jacobs *et al.*, 2009). El uso de indicadores cuantitativos, además de establecer una medición sistemática, es un proceso a través del cual se puede evaluar de manera objetiva, los cambios o variaciones de las plantas en respuesta a ciertos estímulos, como la adición de nutrimentos o algún otro factor que limite o promueva su desarrollo. En la actualidad existen diversos índices de espectroscopia que se usan en la evaluación del comportamiento de algunos cultivos agrícolas, así como en el estudio de otros ecosistemas con actividad fotosintética (Castañeda *et al.*, 2015, Pettorelli *et al.*, 2005). El Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés: *Normalized Difference Vegetation Index*), principalmente usado con imágenes satelitales y sistemas de información geográfica, hace uso de las intensidades de reflectancia en las bandas del rojo de la región visible (R) e infrarroja cercano (NIR en inglés *Near-InfraRed*), quedando definido por la siguiente expresión (Pettorelli *et al.*, 2005):

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad -1 \leq NDVI \leq 1$$

Asimismo, el desarrollo de sensores de imagen de tecnología de estado sólido (CCD, *Charge Coupled Device* y CMOS, *Complementary Metal Oxide Semiconductor*) permite contar con cámaras multispectrales de bajo costo, cuyas imágenes son capaces de determinar el estado de madurez (Garrido-Novell *et al.*, 2012) y defectos en frutos (Li *et al.*, 2011), así como la detección del estrés hídrico en plantas y árboles (Yunseop *et al.*, 2011).

Mahesh *et al.* (2008) determinaron los diferentes tipos de trigo canadiense basado en imágenes espectrales obteniendo una certeza cercana del 94%. Se observaron excitaciones de los grupos funcionales NH, OH, en las regiones entre 960 - 1100 nm y 1420 - 1600 nm,

que se relacionan con el contenido de agua y proteínas de la muestra. El contenido de clorofila de las hojas de los árboles es un indicador clave de la actividad fotosintética de las plantas. La estimación de la concentración de clorofila de los pinos como indicador de vigor, obtenidos por muestreo destructivo, es una labor lenta y costosa, por tal razón se usan alternativas rápidas y no destructivas, en algunos casos son más imprecisas que los métodos indirectos, para esto Curran *et al.* (1995) propusieron usar la frontera entre el rojo y el NIR (690 y 740 nm) para estimar la concentración de clorofila en las acículas de las coníferas *Pinus elliotii*. Al respecto Li *et al.* (2011) encontraron una relación directa entre el contenido de clorofila de las hojas de *Pinus koraiensis* y la reflectancia del espectro comprendido entre 800 a 2500 nm, como método de prueba no destructivo. Así mismo, los resultados presentados por Eitel *et al.* (2010) sugieren que por medio de índices normalizados NDVI y NDRE (*Normalized Difference Red Edge Index*) obtenidos por la reflectancia en los tres anchos de banda: 659–681 nm; 720–740 nm; y >760 nm, se puede identificar el estrés nutricional de plántulas de *Pinus sylvestris* en sus primeras etapas de crecimiento. El monitoreo de la absorbancia/reflectancia de la luz en el espectro NIR podría ser útil, como método no destructivo. Dicho método puede predecir el contenido de clorofila en especies vegetales y estimar el estado fisiológico de las plántulas producidas en viveros forestales. El objetivo del presente trabajo fue desarrollar un índice de vigor vegetal para la detección de síntomas de deficiencia nutrimental de la especie forestal *Pinus greggii* producida en vivero. El índice se determinó a partir del uso de cámaras portátiles de bajo costo modificadas para ser sensibles a la región NIR, utilizando sensores CCD y filtros ópticos. El uso y aplicación de este método de medición no destructivo, tiene el potencial de determinar el estado de vigor de las especies forestales cultivadas en vivero y apoyar en la toma de decisiones en los ciclos de producción de las plantas.

METODOLOGÍA.

La experimentación se realizó en el sitio experimental La Campana de INIFAP ubicado en el semi-desierto de Chihuahua (Latitud 28° 51' 12.035" Longitud -105° 52' 3.650"). Durante el periodo de muestreo se presentó una radiación global máxima de 678 W m⁻² y una temperatura ambiental promedio máxima de 286.5 K en el sitio. La técnica de detección estudiada se basó en el uso de una cámara con sensor de imagen tipo CCD Samsung® de 12.2 Megapíxeles y un filtro óptico para obtener las bandas correspondientes R y NIR (fig. 1A). Una vez capturadas las plántulas se realizó un tratamiento de imágenes para el cálculo NDVI utilizando el software MATLAB® y a partir del análisis tensorial de la información (fig. 1B). Se desarrolló un Índice Ponderado-Normalizado de Vigor Vegetal (IPNV²) para la cuantificación del vigor de plántulas cultivadas en vivero, a partir de la frecuencia de cada valor de NDVI discreto (píxeles) de la imagen capturada. El algoritmo utilizado para el cálculo del IPNV² queda expresado de la siguiente manera:

$$IPNV^2 = \frac{\sum xf(x)}{\sum f(x)}$$

Dónde: $IPNV^2$ es el índice de vigor vegetal que representa los valores NDVI estimados para toda la imagen, $f(x)$ es la frecuencia para cada valor discreto x del NDVI calculado (fig. 2).

Se analizaron plántulas de *Pinus greggii* Engelm de ocho meses de edad, fertilizadas con cuatro niveles de nitrógeno aplicados en una solución nutritiva a base de sulfato de amonio (NH_3SO_4). Como prueba preliminar, en la primera etapa, se evaluaron cuatro plantas, una por cada tratamiento. Los tratamientos de fertilización consistieron en: T1: Dosis Baja = 0.46 g L^{-1} , T2: Media = 0.69 g L^{-1} , T3: Alta = 0.81 g L^{-1} , T4: Muy alta = 0.92 g L^{-1} . Para la obtención del $IPNV^2$ en ésta etapa, se capturó la imagen completa de cada plántula, incluyendo raíces y parte aérea (fig. 1). En la segunda etapa experimental se realizó el análisis de 3 plantas por unidad experimental, con la aplicación de los 4 tratamientos nutrimentales. La captura de las imágenes de estos 12 especímenes se llevó a cabo de manera individual, las fotografías fueron tomadas a una distancia de $25 \pm 5 \text{ cm}$. Se eligió un material de fondo color negro que no interviene con el cálculo del NDVI. La captura se realizó en verano con las plántulas de frente al sol para propiciar una misma intensidad de iluminación. Los valores $IPNV^2$ estimados fueron comparados con atributos morfológicos como: Índice de Robustez (IR), altura de la planta, diámetro y con atributos de calidad como son: la relación de biomasa seca aérea/raíz (PRBS) y el Índice de Calidad de Dickson (ICD) (Sáenz Reyes *et al.*, 2010; Ritchie *et al.*, 2010).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Experimentación etapa 1. Las imágenes de la figura 1 presentan los gráficos obtenidos de la captura de imagen de plántulas con distinta fertilización.

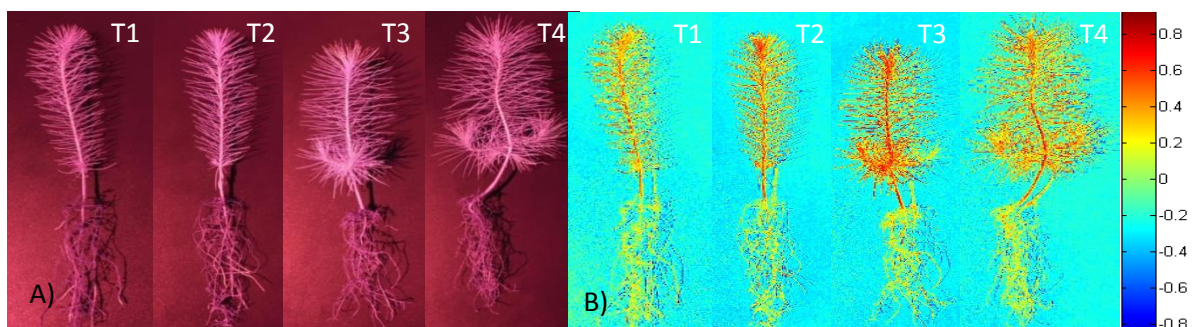


Figura 1. Imágenes de plántulas *Pinus greggii* a distintos tratamientos (T1-T4) de fertilización. A) Bandas NIR+R_r, NIR_g, NIR_b. B) NDVI.

La fig. 2 presenta los valores estimados de la frecuencia NDVI para cada pixel en la captura de las plántulas con los 4 tratamientos de fertilización (T1-T4) de la etapa 1.

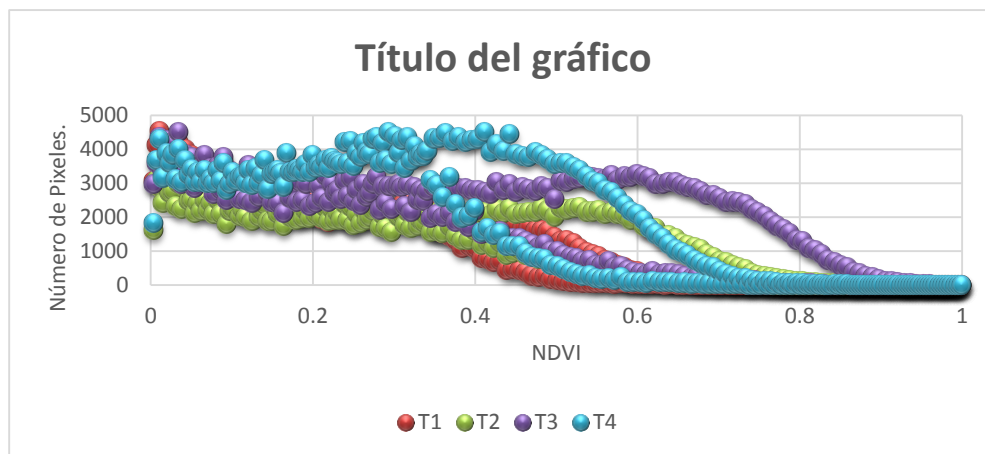


Figura 2. Valores de la frecuencia NDVI estimados de cada píxel para cada plantula por tratamiento.

Se observa en la gráfica de la fig. 2 que los cuatro tratamientos presentaron un comportamiento diferente de valores en los píxeles. El algoritmo desarrollado para el cálculo $IPNV^2$ permite integrar todos estos valores en el índice.

En la Tabla 1 se presentan los parámetros los valores obtenidos IR, $IPNV^2$ con y sin raíz y el ICD en la experimentación de la etapa 1. La relación altura/diámetro del cuello de la raíz o IR relaciona la altura y el diámetro del cuello de la raíz de la planta, valores más bajos indican una mejor calidad de la planta, más robusta y con tallo vigoroso (Sáenz *et al.*, 2010). En la Tabla 1 se observa que los valores IR óptimos concuerdan con los resultados del $IPNV^2$. Así también, el ICD considera varios atributos morfológicos: altura, diámetro y los pesos secos aéreo, raíz y total, un valor mayor representa una mejor calidad de planta (Dickson *et al.*, 1960). En esta tabla se compara y evidencia que el tratamiento T3 presenta el mejor valor $IPNV^2$, concordando con el valor óptimo del ICD.

Tabla 1. Atributos morfológicos de calidad de planta e $IPNV^2$ obtenidos en la etapa 1, en plantas de *Pinus greggii Engelm* bajo diferentes niveles de fertilización nitrogenada.

Tratamiento	IR	$IPNV^2$ con raíz	$IPNV^2$ sin raíz	ICD
T1	8.515	0.220	0.380	4.847
T2	6.742	0.296	0.444	6.207
T3	6.735	0.339	0.492	10.435
T4	7.014	0.284	0.408	7.508

Experimentación etapa 2. En las imágenes de la etapa anterior (fig. 1) se detectaron valores positivos de NDVI en la sombra de la imagen. En esta etapa se utilizó un difusor de luz para

mejorar la captura y eliminar la sombra de la imagen. La fig. 3 presenta un gráfico obtenido de la captura individual de las plántulas como prueba no destructiva. Se fotografiaron 12 plántulas tratadas con los distintos niveles de fertilización.

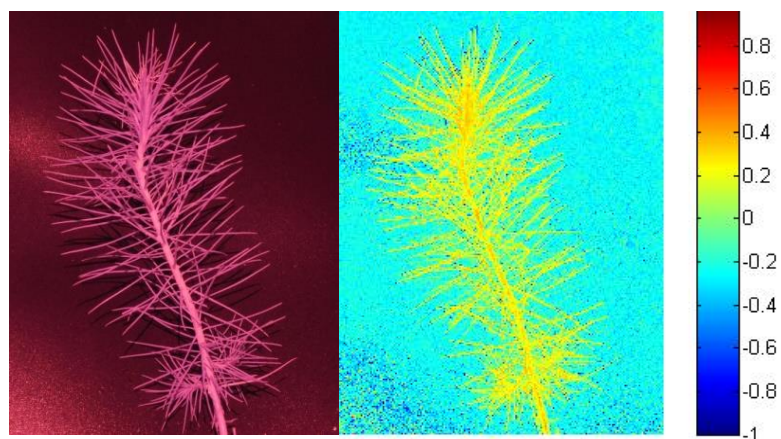


Figura 3. Imágenes a) NIR b) NDVI para prueba no destructiva de vigor en plántulas *Pinus greggii*.

la Tabla 2 presenta los parámetros de la caracterización morfológica y los valores $IPNV^2$ calculados. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas en las variables biomasa aérea ($p \leq 0.001$) y biomasa total (0.004); no obstante en el resto de las variables sobresalió el tratamiento T3, lo que presenta al valor $IPNV^2$ como consistente con el resto de los tratamientos. El indicador de la relación en peso de biomasa seca PRBS refleja el desarrollo de la planta en vivero. Una buena relación debe fluctuar entre 1.5 y 2.5, valores mayores indican desproporción y la existencia de un sistema radical insuficiente para proveer de energía a la parte aérea de la planta (Sáenz Reyes *et al.*, 2010). Los valores del PRBS resumidos en la Tabla 2, de los cuatro tratamientos, no cumplen con la recomendación. El valor PRBS en torno a 2.5 corresponde al tratamiento T3, en acorde con el valor más alto del $IPNV^2$. Los otros valores PRBS no son cercanos a 2.5, lo que podría indicar que las plántulas no son aptas para sitios de plantación donde la precipitación es escasa, debido al desbalance entre la parte de transpiración y absorción de humedad (Sáenz Reyes *et al.*, 2010). Además de la respuesta obtenida en el crecimiento de las plantas por la adición de fertilizante, el uso de este método, puede indicar un diagnóstico de la condición nutrimental de las plantas, debido a que estas fueron sensibles a las dosis aplicadas. Se encontró que la respuesta no fue lineal, ya que en el tratamiento T4 (dosis muy alta), la planta no continuó su crecimiento, lo cual aumenta la concentración de nutrimentos pero no la biomasa, (consumo de lujo) ubicando el punto máximo en el tratamiento T3 (dosis alta) o rango óptimo, mientras que en los otros dos se registraron bajas tasas de crecimiento, o estados de deficiencia (Landis *et al.*, 2005).

Cuadro 2. Atributos morfológicos de calidad de planta e IPNV² en la experimentación de la etapa 2, con plantas de *Pinus greggii* bajo diferentes niveles de fertilización.

Tratamiento	IPNV ² promedio (parte aérea)	Biomasa seca aérea (g)	Biomasa seca radical (g)	Biomasa seca total (g)	Relación biomasa seca aérea/raíz (PRBS)
T1	0.174	0.700	0.185	0.887	3.839
T2	0.171	0.503	0.132	0.637	3.939
T3	0.193	0.993	0.175	1.167	2.968
T4	0.180	0.520	0.185	0.653	4.257

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se ofrece evidencia a la importancia, del desarrollo de métodos sensibles e índices que cuantifiquen al vigor vegetal; ii) La medición morfológicas de la talla de las especies vegetales, no valora con exactitud el estado fisiológico de las mismas; iii) Los valores IPNV2 en la raíz de las plántulas no son significativos al análisis comparativo, la captura en imagen de la parte aérea es suficiente para el ejercicio comparativo.; iv) El uso de este método de detección no destructivo, tiene el potencial de determinar el estado de vigor de las especies forestales cultivadas en el vivero y apoyar en la toma de decisiones en los ciclos de producción; v) Complementará la caracterización de los atributos de calidad de las especies en estudio; vi) En base a los resultados PRBS experimentales de los cuatro tratamientos se observó que ninguno cumple con la recomendación, esto puede estar asociado a la limitación del espacio para el desarrollo radicular, ocasionado por la forma estrecha del contenedor así como al hábito de crecimiento de la especie. vii) El sistema de tratamiento de datos requiere de personal especializado y es viable su semi-automatización; viii) El dispositivo de captura de datos es portátil y de bajo presupuesto, pero se requiere de un entrenamiento para la captura de imágenes. Se espera a mediano plazo: se adopte en viveros e inspecciones forestales, que auxilien a evaluar el estado fisiológico de las especies e incrementar la probabilidad de éxito de la actividad silvícola.

BIBLIOGRAFÍA:

- Castañeda del Álamo, C., Jiménez Castañeda, A., Latorre Garcés, B., Luna Jordán, E. (2015). Tratamiento automático de imágenes Landsat en entorno SIG para gestión de espacios protegidos: Laguna de Gallocanta, España. XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección: Humedales y espacios protegidos (Sevilla. 21-23 octubre).
- Curran, P. J., Windham, W. R., Gholz, H. L. (1995). Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll concentration in slash pine leaves. *Tree physiology*, 15(3), 203-206.
- Dickson, A., Leaf, A. L., Hosner, J. F. (1960). Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *The Forestry Chronicle*, 36(1), 10-13.
- Eitel, J. U. H., Keefe, R.F., Long, D. S., Davis, A. S., Vierling, L. A. (2010). Active Ground Optical Remote Sensing for Improved Monitoring of Seedling Stress in Nurseries. *Sensors*, 10, 2843-2850.
- Garrido-Novell, C., Pérez-Marin, D., Amigo, J. M., Fernández-Navales J. J. Guerrero E., Garrido-Varo A. (2012). Grading and color evolution of apples using RGB and hyperspectral imaging vision cameras. *Journal of Food Engineering*, 113, 281–288.
- Jacobs, D. F., & Landis, T. D. (2009). *Hardening. Nursery manual for native plants: a guide for tribal nurseries*. United States: Department of Agriculture, Forest Service.
- Jiangbo, L., Xiuqin R., Yibin Y. (2011). Detection of common defects on oranges using hyperspectral reflectance imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 78, 38–48.
- Landis, T. D., Haase, D., Dumroese, K. *Plant Nutrient Testing and Analysis in Forest and Conservation Nurseries* In: Dumroese, R. K.; Riley, L. E.; Landis, T. D. (2005). *National proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations—2004; 2004 July 12–15; Charleston, NC; and 2004 July 26–29; Medford, OR. Proc. RMRS-P-35. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.*
- Li, Y., Zhang, Y., Jiang, L. (2011). Modeling chlorophyll content of korean pine needles with NIR and SVM. *Procedia Environmental Sciences*, 10, 222-227.
- Mahesh, S., Manickavasagan, A., Jayas, D.S., Paliwal, J., White, N.D.G. (2008). Feasibility of near-infrared hyperspectral imaging to differentiate Canadian wheat classes. *Biosystems engineering*, 101, 50–57.
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in ecology & evolution*, 20(9), 503-510.
- Red de monitoreo INIFAP, estación Aldama. <http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/>
- Ritchie, G. A., Landis, T. D., Dumroese, R. K., Haase, D. L. (2010). Assessing plant quality. *The container tree nursery manual*, 7, 17-81.
- Sáenz, R. J. T., Villaseñor, R. F. J., Muñoz, F. H. J., Rueda, S. A., Prieto, R. J. A. (2010). Calidad de planta en viveros forestales de clima templado en Michoacán. Folleto Técnico 17. SAGARPA-INIFAP-CIRPAC-Campo Experimental Uruapan. p 48.
- Yunseop, K., David M. G., Park, J., Henry, K. Ngugi, Brian, Lehman, L. (2011). Hyperspectral image analysis for water stress detection of apple trees. *Computers and Electronics in Agriculture*, 77, 155–160.

MÉTODO NO DESTRUCTIVO PARA EVALUAR EL VIGOR VEGETAL EN ESPECIES FORESTALES CULTIVADAS EN VIVERO.

Héctor López-Aguilar¹, José Luis García-Pérez¹, Eutiquio Barrientos-Juárez¹, Jorge Alberto Gómez³, Antonino Pérez-Hernández²

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias

² Centro de Investigación en Materiales Avanzados

³ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

INTRODUCCIÓN

La medición de algunas características fisiológicas que reflejan el estado sanitario, nutricional e hídrico de las plantas empleadas para la reforestación es costosa, debido al uso de instrumentos sofisticados, en comparación con los atributos morfológicos que se obtienen de manera directa [1]. El uso de indicadores cuantitativos, además de establecer una medición sistemática, es un proceso por el cual se puede evaluar de manera objetiva, los cambios o variaciones de las plantas en respuesta a ciertos estímulos, como la adición de nutrientes o algún otro factor que limite o promueva su desarrollo.

En la actualidad existen diversos índices de espectroscopia que se usan en la evaluación del comportamiento de algunos cultivos agrícolas, así como en el estudio de otros ecosistemas con actividad fotosintética [2,3]. Entre ellos el NDVI (Índice Normalizado Diferencial de Vegetación), principalmente usado con imágenes satelitales y sistemas de información geográfica, hace uso de las intensidades de reflectancia en las bandas del rojo de la región visible (R) y el infrarrojo cercano (NIR). Asimismo, el desarrollo de sensores de imagen de tecnología de estado sólido (CCD, Charge Coupled Device y CMOS, Complementary Metal Oxide Semiconductor) permite contar con cámaras multispectrales de bajo costo, cuyas imágenes son capaces de determinar el estado de madurez [4] y defectos en frutos [5], así como la detección del estrés hídrico en plantas y árboles [6].

La clorofila contenida de las hojas, de las plantas, es un indicador clave de su actividad fotosintética. La estimación de la concentración de clorofila, obtenidos por muestreo destructivo en pinos, como indicador de vigor es una labor lenta y costosa. Esto hace atractivo la búsqueda y uso de alternativas rápidas y no destructivas. Curran et al. propusieron usar la espectroscopia, en la frontera entre el rojo visible y el NIR (λ : 690 a 740 nm), para estimar la concentración de clorofila en las acículas de las coníferas *Pinus elliottii* [7]. Al respecto Li et al. encontraron una relación directa entre el contenido de clorofila de las hojas, de *Pinus koraiensis*, y la reflectancia del espectro comprendido λ : 800 a 2500 nm como método de prueba no destructivo [5]. Así mismo, Eitel et al. sugieren que por medio de índices normalizados y por la reflectancia (NDVI y NDRE), obtenidos en tres anchos de banda: 659–681 nm; 720–740 nm; y >760 nm, se puede identificar el estrés nutricional de plántulas de *Pinus sylvestris* en sus primeras etapas de crecimiento [8]. El objetivo del presente trabajo fue; desarrollar un índice de vigor vegetal, para la detección de síntomas de deficiencia nutricional, de la especie forestal *Pinus greggii* en vivero. Para lo cual se modificaron cámaras comerciales, para ser sensibles a la región NIR y el rojo visible.

MATERIALES Y MÉTODOS

La técnica de detección estudiada se basó en el uso de una cámara, con sensor de imagen tipo CCD Samsung® de 12.2 Megapíxeles, y un filtro óptico para obtener las bandas correspondientes R y NIR (fig. 1). Una vez capturadas las imágenes, de las plántulas, se realizó un tratamiento partir del análisis tensorial de la información, para el cálculo NDVI utilizando el software MATLAB®. Se obtuvo el Índice Ponderado-Normalizado de Vigor Vegetal (IPNV²), de plántulas cultivadas en vivero, a partir de la frecuencia de cada valor de NDVI discreto (píxeles) de la imagen capturada. El algoritmo utilizado para el cálculo de este índice queda expresado de la siguiente manera:

$$IPNV^2 = \frac{\sum xf(x)}{\sum f(x)}$$

Dónde: IPNV² es el Índice Ponderado-Normalizado de Vigor Vegetal que representa los valores NDVI estimados para toda la imagen (píxeles) y f(x) es la frecuencia para cada valor discreto x del NDVI calculado (fig. 2).

Se analizaron plántulas de *Pinus greggii* Engelm de ocho meses de edad, fertilizadas con cuatro niveles de nitrógeno aplicados en una solución nutritiva a base de sulfato de amonio (NH₄SO₄). Como prueba preliminar, en la primera etapa, se evaluaron cuatro plantas, una por cada tratamiento. Los tratamientos de fertilización consistieron en: T1: Dosis Baja = 0.46 g L⁻¹, T2: Media = 0.69 g L⁻¹, T3: Alta = 0.81 g L⁻¹, T4: Muy alta = 0.92 g L⁻¹. Para la obtención del IPNV² la primer etapa, se capturó la imagen completa de cada plántula, incluyendo raíces y parte aérea (fig. 1). En la segunda etapa experimental se realizó el análisis de 3 plantas por unidad experimental, con la aplicación de los 4 tratamientos nutricionales. La captura de las imágenes de estos 12 especímenes se llevó a cabo de manera individual, las fotografías fueron tomadas a una distancia de 25±5 cm. Se eligió un material de fondo color negro que no interfiere con el cálculo del NDVI (fig. 3). En todos los casos, la captura se realizó con las plántulas de frente al sol para propiciar una misma intensidad de iluminación. Los valores IPNV² estimados fueron comparados con atributos morfológicos como: Índice de Robustez (IR), altura de la planta, diámetro y con atributos de calidad como son: la relación de biomasa seca aérea/raíz (PRBS) y el Índice de Calidad de Dickson (ICD) [9,10].

BIBLIOGRAFÍA:

- [1] Jacobs, D. F., & Landis, T. D. (2009). Hardening. Nursery manual for native plants: a guide for tribal nurseries. United States. Department of Agriculture, Forest Service.
- [2] Castañeda del Álamo, C., Jiménez Castañeda, A., Latorre Garcés, B., Luna Jordán, E. (2015). Tratamiento automático de imágenes Landsat en entorno SIG para gestión de espacios protegidos. Laguna de Gallocanta, España. XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección: Humedales y espacios protegidos.
- [3] Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. Trends in ecology & evolution, 20(9), 503-510.
- [4] Garrido-Novell, C., Pérez-Marin, D., Amigo, J. M., Fernández-Navales J. J., Guerrero E., Garrido-Varo A. (2012). Grading and color evolution of apples using RGB and hyperspectral imaging vision cameras. Journal of Food Engineering, 113, 281–288.
- [5] Li, Y., Zhang, Y., Jiang, L. (2011). Modeling chlorophyll content of Korean pine needles with NIR and SVM. Procedia Environmental Sciences, 10, 222-227.
- [6] Yunseop, K., David M. G., Park, J., Henry, K. Ngugi, Brian, Lehman, L. (2011). Hyperspectral image analysis for water stress detection of apple trees. Computers and Electronics in Agriculture, 77, 155–160.
- [7] Curran, P. J., Windham, W. R., Gholz, H. L. (1995). Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll concentration in slash pine leaves. Tree physiology, 15(3), 203-206.
- [8] Eitel, J. U. H., Keeffe, R. F., Long, D. S., Davis, A. S., Wierling, L. A. (2010). Active Ground Optical Remote Sensing for Improved Monitoring of Seedling Stress in Nurseries. Sensors, 10, 2843-2850.
- [9] Sáenz, R. J. T., Villaseñor, R. F. J., Muñoz, F. H. J., Rueda, S. A., Prieto, R. J. A. (2010). Calidad de planta en viveros forestales de clima templado en Michoacán. Folleto Técnico 17. SAGARPA-INIFAP-CIRPAC-Campo Experimental Uruapan, p. 48.
- [10] Ritchie, G. A., Landis, T. D., Dumroese, R. K., Haase, D. L. (2010). Assessing plant quality. The container tree nursery manual, 7, 17-81.

RESULTADOS Y DISCUSION

Las imágenes de la fig. 1, presentan las imágenes de plántulas con distinta fertilización.

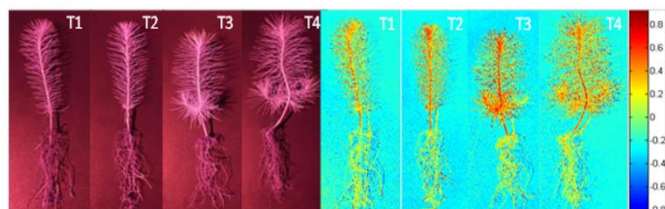


Fig. 1. Imágenes de plántulas *Pinus greggii* a distintos tratamientos (T1-T4) de fertilización. A) Bandas NIR+R; NIRb. B) NDVI.

La fig. 2 presenta los valores ponderados NDVI para cada tratamiento de imagen de las plántulas con los 4 niveles de fertilización (T1-T4).

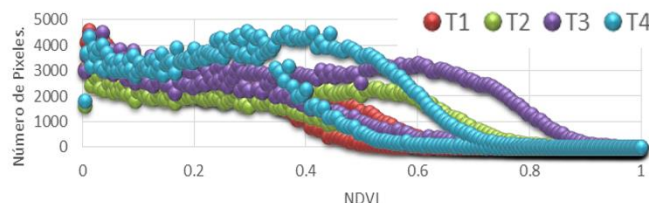


Fig. 2. Valores de NDVI ponderados, estimados para cada tratamiento de imagen.

Tabla 1. Atributos morfológicos de calidad de planta e IPNV² obtenidos en la etapa 1, en plantas de *Pinus greggii* bajo diferentes niveles de fertilización nitrogenada.

Tratamiento	IR	IPNV ² con raíz	IPNV ² sin raíz	ICD
T1	8.515	0.220	0.380	4.847
T2	6.742	0.296	0.444	6.207
T3	6.735	0.339	0.492	10.435
T4	7.014	0.284	0.408	7.508

Se observa que el tratamiento T3 presenta el mejor valor IPNV² (Tabla 1), concordando con el valor óptimo del IR y el ICD.

La fig. 3 presenta un gráfico de la captura individual de las plántulas como prueba no destructiva. En la segunda etapa se fotografiaron 12 plántulas tratadas con los niveles de fertilización (T1-T4).

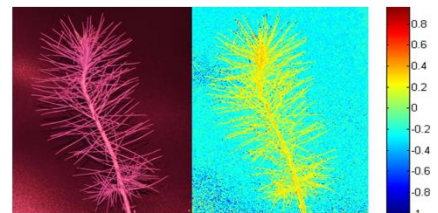


Figura 3. Imágenes a) NIR b) NDVI para prueba no destructiva de vigor en plántulas *Pinus greggii*.

Tabla 2. Atributos morfológicos de calidad de planta e IPNV² en la experimentación de la etapa 2, con plantas de *Pinus greggii* bajo diferentes niveles de fertilización.

Tratamiento	IPNV ² prom (parte aérea)	Biomasa seca aérea (g)	Biomasa seca radical (g)	Biomasa seca total (g)	PRBS
T1	0.174	0.700	0.185	0.887	3.839
T2	0.171	0.503	0.132	0.637	3.939
T3	0.193	0.993	0.175	1.167	2.968
T4	0.180	0.520	0.185	0.653	4.257

Una buena relación PRBS (Tabla 2) fluctúa entre 1.5 y 2.5, valores mayores indican desproporción y la existencia de un sistema radical insuficiente para proveer de energía a la parte aérea [9]. El valor PRBS en torno a 2.5 corresponde al tratamiento T3, en acorde con el valor más alto del IPNV².

CONCLUSIONES.

- Se ofrece evidencia a la importancia, del desarrollo de métodos sensibles e índices que cuantifiquen al vigor vegetal;
- La medición morfológica de la talla de las especies vegetales, no valora con exactitud el estado fisiológico de las mismas;
- Los valores IPNV² en la raíz de las plántulas no son significativos al análisis comparativo, es decir, la captura en imagen de la parte aérea es suficiente para el ejercicio comparativo;
- El uso de este método de detección no destructivo, tiene el potencial de determinar el estado de vigor de las especies forestales cultivadas en el vivero y apoyar en la toma de decisiones en los ciclos de producción;
- Complementará la caracterización de los atributos de calidad de las especies;
- El valor PRBS (Tabla 2) se atribuye a la limitación del espacio para el desarrollo radicular, ocasionado por la forma estrecha del contenedor así como al hábito de crecimiento de la especie;
- El sistema de tratamiento de datos requiere de personal especializado y es viable su semi-automatización;
- El dispositivo de captura de datos es portátil y de bajo presupuesto, pero se requiere de un entrenamiento para la captura de imágenes. Se espera a mediano plazo: se adopte en viveros e inspecciones forestales, que auxilien a evaluar el estado fisiológico de las especies e incrementar la probabilidad de éxito de la actividad silvícola.