



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i58.594>

Artículo

Concentraciones críticas nutrimentales y normas DRIS para árboles de medio turno de *Cedrela odorata* L.

Critical nutrient concentrations and DRIS norms for mid-rotation *Cedrela odorata* L. trees

Luis Alberto Parra Piedra¹, Miguel Ángel López López^{1*}, Armando Gómez Guerrero¹ y Víctor Manuel Ordaz Chaparro²

Abstract

Nutrient diagnosis helps increase fertilizer use efficiency in forest plantations as well as economic profits and ecological benefits. Two of the methods commonly used for diagnosis of the nutrient status are critical nutrient concentrations and the Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS); however, no studies exist that show the critical values or DRIS norms for *Cedrela odorata* (red cedar); which is an important tropical tree species. The aim of the present study was to develop a set of critical nutrient concentrations and a set of DRIS norms as well, for *C. odorata* at the mid-rotation stage. The study was carried out by selecting 74 trees located over the species natural distribution area in Mexico, on which diameter increment and nutrient concentration was recorded from July 2017 to January 2018. A set of critical nutrient concentrations and one more of DRIS norms were developed. In a second phase of the study, both nutrient standards were verified by using an experiment installed within a red cedar mid-rotation plantation. The experimental design was a complete randomized, with a 3×4 factorial arrangement of treatments, where the factors corresponded to the application of P and K, respectively. A set of critical nutrient concentrations and a set of DRIS norms for *C. odorata* at its mid-rotation stage are exhibited in this paper. The verification process indicates that both reference sets correctly predict nutrient status of mid-rotation red cedar trees.

Key words: Red cedar, nutrient diagnosis, fertilization, forest nutrition, nutrients, Diagnosis and Recommendation Integrated System.

Resumen

El diagnóstico nutrimental ayuda a mejorar la eficiencia del uso de fertilizantes en plantaciones forestales y a incrementar tanto las utilidades económicas, como los beneficios ecológicos. Dos métodos comúnmente usados, para tal efecto, son las concentraciones críticas y el Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación (DRIS); sin embargo, no existen estudios que aporten los valores críticos o normas DRIS para *Cedrela odorata* (cedro rojo), especie importante en las regiones tropicales. El objetivo del presente estudio fue desarrollar un conjunto de concentraciones críticas y uno de normas DRIS para *C. odorata* en su etapa de medio turno. El estudio se realizó con 74 árboles localizados a lo largo del área de distribución natural del taxon en México, a los cuales se les determinó el incremento diamétrico y la concentración nutrimental entre julio de 2017 y enero de 2018. Se derivó un conjunto de concentraciones críticas y uno de normas DRIS. Una segunda fase fue la verificación de las concentraciones críticas y normas DRIS generadas, mediante un experimento en una plantación de cedro rojo de medio turno. El ensayo fue completamente al azar con arreglo factorial 3 × 4, en el que los factores correspondieron a la aplicación de P y K, respectivamente. Se presenta un conjunto de concentraciones críticas y uno de normas DRIS para árboles de *C. odorata* de medio turno. El proceso de verificación indica que ambos conjuntos de valores de referencia predicen correctamente el estado nutrimental de los árboles de medio turno del cedro rojo.

Palabras clave: Cedro rojo, diagnóstico nutrimental, fertilización, nutrición forestal, nutrimento, Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación.

Fecha de recepción/Reception date: 14 de junio de 2019

Fecha de aceptación/Acceptance date: 22 de enero de 2020

¹ Posgrado en Ciencias Forestales, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. México.

² Posgrado en Edafología, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. México.

*Autor por correspondencia, correo-e: lopezma@colpos.mx

Introducción

Cedrela odorata L. es una de las especies forestales más importantes en las regiones tropicales y subtropicales de México y Sudamérica, además en el ámbito comercial es considerada una de las más valiosas del mundo (Russell *et al.*, 1993; Semarnat, 2016), por las propiedades y características estéticas de su madera: es suave, blanda, fácil de trabajar por los ebanistas y de agradable aroma; cuya belleza es sinónimo de calidad y buen gusto. Una vez seca, es resistente al ataque de insectos (Brown y Pacheco, 2006). Junto con *Swietenia macrophylla* King, *Tectona grandis* L. f. y *Eucalyptus* sp. incluyen los taxones forestales más plantados México (Ramírez *et al.*, 2013). Se cultiva de manera intensiva en los trópicos del continente americano, por lo general crece en las selvas tropicales lluviosas (Muellner *et al.*, 2009).

En el mercado nacional, la demanda de madera de cedro rojo es de gran relevancia y la oferta es insuficiente debido, en parte, a la baja productividad de la especie en condiciones naturales o incluso en plantaciones; la cual, como en todas las especies forestales, se puede incrementar mediante la adición de fertilizantes, si se aplican los nutrimentos deficientes en el sitio. No obstante, para definir cuáles son estos, es necesario llevar a cabo un diagnóstico de los árboles en ese contexto o de la fertilidad del suelo.

Las concentraciones críticas y el sistema *Diagnosis and Recommendation Integrated System* (DRIS) son dos de las técnicas más utilizadas para dicho diagnóstico en los taxa forestales, y han dado buenos resultados tanto en plantaciones comerciales, como en bosques naturales (Moreno *et al.*, 2002; Osiecka *et al.*, 2019). Las primeras se refieren a las concentraciones foliares de nutrimentos, con las que se obtiene un rendimiento entre 90 y 100 %, respecto al rendimiento potencial (Medina-Morales, 2004) y son particulares para cada taxon y nutrimento; sin embargo, en el caso de *C. odorata* se desconocen los valores.

El DRIS es un sistema de diagnóstico nutrimental desarrollado y probado por Beaufils y Sumner (1976), diseñado para especies forestales en particular y, posteriormente, aplicado a múltiples cultivos agrícolas. Consiste en un conjunto de normas (medias y

coeficientes de variación) correspondientes a cocientes entre los nutrimentos de interés. En la actualidad existen conjuntos de normas DRIS para pocas especies forestales mexicanas y, pese a la elevada demanda de madera de *C. odorata*, no existen tales regulaciones para ella, pese a que son necesarias para contribuir al diseño de programas orientados a su manejo sustentable. Por lo anterior, en el presente estudio se generó un conjunto de concentraciones críticas y uno de normas DRIS para *C. odorata*.

Materiales y Métodos

Generación de concentraciones críticas nutrimentales y normas DRIS

Procedimiento de muestreo

Se hizo un muestreo dirigido a seleccionar una serie de árboles individuales (74) con la intención de cubrir la mayor parte del área de distribución natural de la especie en México (Pennington y Sarukhán, 1998; Conabio, 2017), los cuales quedaron, finalmente, establecidos en los estados de Veracruz, Puebla, Tabasco, Chiapas, Campeche, Quintana Roo y Yucatán. Los individuos seleccionados eran ejemplares sanos, sin daños mecánicos, ni bifurcaciones, dominantes y codominantes, libres de fructificación excesiva; se ubicaron en la categoría diamétrica de 15 a 19 cm iniciales o medio turno y en sitios de fácil acceso para su control.

Variables evaluadas

La variable respuesta evaluada fue el incremento en diámetro normal (diámetro a 1.3 m sobre el nivel del suelo, en un período de evaluación de 7 meses) y se calculó mediante la sustracción del diámetro normal medido en julio del 2017, al diámetro normal medido en enero del 2018, para cada uno de los 74 árboles.

El diámetro normal se registró con cinta diamétrica (*Forestry Suppliers 20FT*) y se marcó con tinta indeleble su huella sobre la circunferencia del fuste. La altura del árbol se determinó con una pistola *Haga W-Germany* y el método de medición desarrollado por López (2005). Las coordenadas geográficas a la base del árbol se fijaron con un GPS *Garmin Venture Cx*. Cada árbol se marcó con el número consecutivo correspondiente, con pintura fosforescente para su posterior identificación y remediación.

Remediación de los árboles

Al cabo de siete meses posteriores a la medición inicial de los árboles, se remidieron las mismas variables. Además, de cada individuo se recolectó una muestra de 30 folíolos, conforme a lo indicado por Wells y Allen (1985).

El material recolectado se transportó en recipientes (neveras) con hielo al laboratorio Salvador Alcalde Blanco del Colegio de Postgraduados, donde se determinó la concentración foliar de N, P, K, Ca, Mg, B, Cu, Fe, Mn y Zn por árbol. El N se obtuvo mediante el método *micro-Kjeldahl*, y el resto de los nutrimentos a partir de una digestión con ácidos sulfúrico, perclórico y nítrico; posteriormente, se tomó una alícuota de esta que se analizó con un espectrofotómetro de plasma inductivamente acoplado (ICP-AES) (*VARIAN 725-ESI*).

Análisis de datos

Los datos se analizaron con la metodología descrita por Beaufils y Sumner (1976), para la elaboración de normas DRIS y concentraciones críticas (Walworth y Sumner, 1987). Para las del segundo tipo, se subdividió el total de 74 observaciones en dos subgrupos: de alto rendimiento (16 %) y de bajo rendimiento (74 %) (Medina y Medina 1992). Tales concentraciones para la especie de interés en edad de medio turno correspondieron a las medias de cada nutrimento en los árboles de alto

rendimiento. Las normas DRIS consistieron en los cocientes de las concentraciones de los nutrientes en la misma subpoblación. A cada cociente se le determinó su media y su coeficiente de variación.

Validación de las concentraciones críticas y normas DRIS generadas

Descripción de la parcela experimental

Para validar los conjuntos de concentraciones críticas y normas DRIS, se escogió una plantación de *C. odorata* con una superficie de siete hectáreas (Figura 1). La plantación tiene 10 años de edad, un espaciamiento de 4 × 3 m, categorías diamétricas entre 15 y 20 cm, suelo aluvial y pendiente < a 5 %.

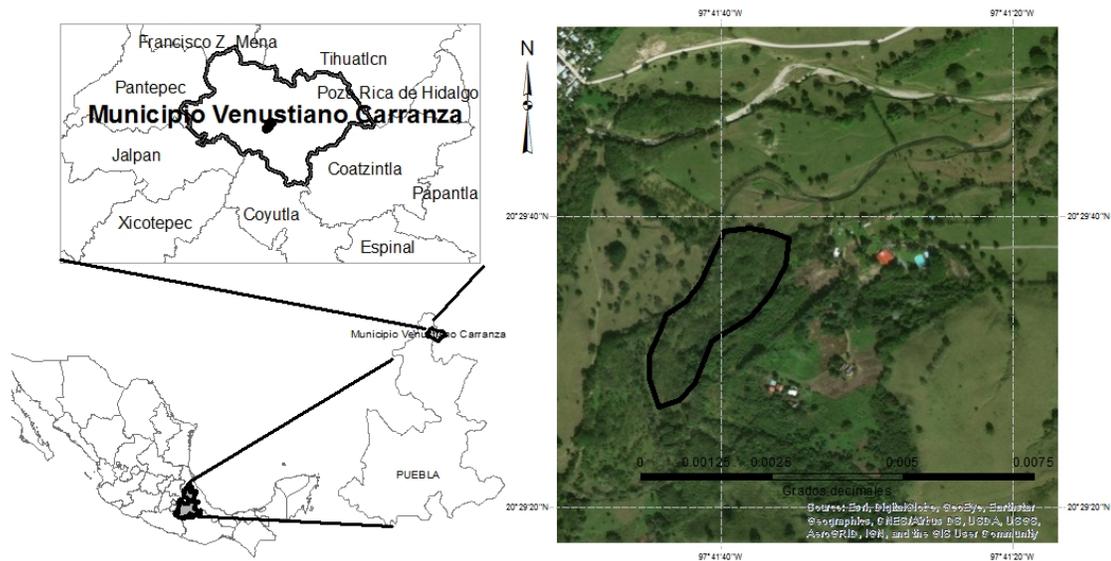


Figura 1. Ubicación de la parcela experimental de *Cedrela odorata* L. en Villa Lázaro Cárdenas, municipio Venustiano Carranza, Puebla.

Diagnóstico de la condición nutrimental de la parcela experimental

Con base en la homogeneidad del área experimental (superficie plana y árboles coetáneos), el diagnóstico nutrimental inicial se hizo a partir de tres muestras foliares procedentes de tres árboles distribuidos aleatoriamente en el área experimental, las cuales se recolectaron conforme al protocolo de Wells y Allen (1985), para muestreos foliares de árboles forestales con fines de análisis químicos. Las muestras se enviaron al laboratorio Salvador Alcalde Blanco del Colegio de Postgraduados donde se analizaron los elementos antes mencionados con las metodologías ya descritas.

Además, se hizo un muestreo de suelos del área de estudio, en el que se obtuvieron nueve submuestras a una profundidad entre 0 y 30 cm, a partir de las cuales se conformaron tres muestras compuestas. En laboratorio se determinó el pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO) y capacidad de intercambio catiónico (CIC), así como las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg, Mn, Fe, B, Cu y Zn. Con base en estos resultados se definió la fertilidad general del sitio experimental y los tratamientos que se deben aplicar.

Diseño experimental

Se seleccionó un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial de los tratamientos, en el cual la unidad experimental estuvo constituida por un árbol, en la categoría diamétrica de 15 a 19 cm de diámetro normal y 12 m de altura, aproximadamente. Cada tratamiento se replicó cinco veces y los factores probados fueron P y K, con tres niveles (dosis) de P y cuatro de K, lo que dio un total de 12 tratamientos.

La variable repuesta fue el incremento en diámetro normal y el modelo estadístico utilizado:

$$y_{ij} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \epsilon_{ij}$$

Donde:

$i = 1,2,3$ Número de niveles del factor A (fósforo)

$j = 1,2,3$ Número de niveles del factor B (potasio)

ij = Valor de la variable respuesta correspondiente al nivel i del factor A ; nivel j del factor B

μ = Media general

A_i = Efecto del nivel i de A

B_j = Efecto del nivel j de B

AB_{ij} = Interacción de los factores A y B

ε_{ij} = Error experimental correspondiente al nivel i del factor A , nivel j del factor B

Debe cumplirse que $\varepsilon_{ij} \sim NIID(0, \sigma^2)$

Para asignar los tratamientos a las unidades experimentales, se corrió una aleatorización mediante el *software R* (The R Project, 2017).

Tratamientos aplicados

Los 12 tratamientos de fertilización resultantes de la combinación de los niveles de P y K (Cuadro 1) se aplicaron a las unidades experimentales previamente seleccionadas.



Cuadro 1. Factores y niveles probados en el experimento de fertilización de *Cedrela odorata* L. en Venustiano Carranza, Puebla.

| Niveles | P | K | Número de repeticiones |
|---------|---|---|------------------------|
| | (mL de H ₃ PO ₄ ² por árbol) | (g de K ₂ SO ₄ por árbol) | |
| 1 | 0 | 0 | 5 |
| 2 | 390 | 660 | 5 |
| 3 | 690 | 1 340 | 5 |
| 4 | | 2 000 | 5 |

De forma adicional a los 12 tratamientos, se estableció un tratamiento sin fertilización (testigo absoluto). A cada una de las unidades experimentales, excepto los testigos absolutos, se le aplicó N en forma de urea comercial, a razón de 600 g por árbol y 100 mL de microelementos en la presentación comercial llamada "sagaquel combi" (Fe=3.1 %, Zn=4.05 %, B=0.05 %, Cu=0.04 %, Co=0.002 %, Mn=0.25 %, Mo=0.005 %). Estos materiales fertilizantes se suministraron para asegurar la ausencia de deficiencias de dichos nutrimentos en todo el experimento. Su adición, y la de los tratamientos con P y K se hizo en ocho hoyos de 30 cm de profundidad en el suelo, a una distancia de 1 m de la base de cada árbol.

Al momento de aplicar los tratamientos, se eliminaron las malezas con el uso de un herbicida sistémico a base de glifosato, el cual se aplicó en un radio de 2 m alrededor de cada árbol, se incluyeron los testigos absolutos; esto evitó el consumo de nutrimentos por las malezas.

Variables respuesta

A cada unidad experimental se le midió el diámetro a 1.30 m sobre el nivel del suelo. La primera medición se realizó el 22 de octubre del 2017 y la segunda el 22 de octubre del 2018. A partir de estas mediciones, se obtuvo el incremento de diámetro anual (cm año⁻¹).

En septiembre del 2018 se recolectó una muestra foliar de tres unidades experimentales por tratamiento, según las recomendaciones de Wells y Allen (1985). Las muestras se prepararon para su análisis en el laboratorio Salvador Alcalde Blanco del Colegio de Postgraduados, donde se determinó N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, B y Zn, por los métodos mencionados anteriormente.

Resultados

La Figura 2 ilustra las dos subpoblaciones en que fue dividida la población de 74 árboles evaluados. La de alto rendimiento incluyó 16 % (11 árboles) del total de individuos de la población, mientras que la de bajo rendimiento se conformó por 63 árboles (84 %).

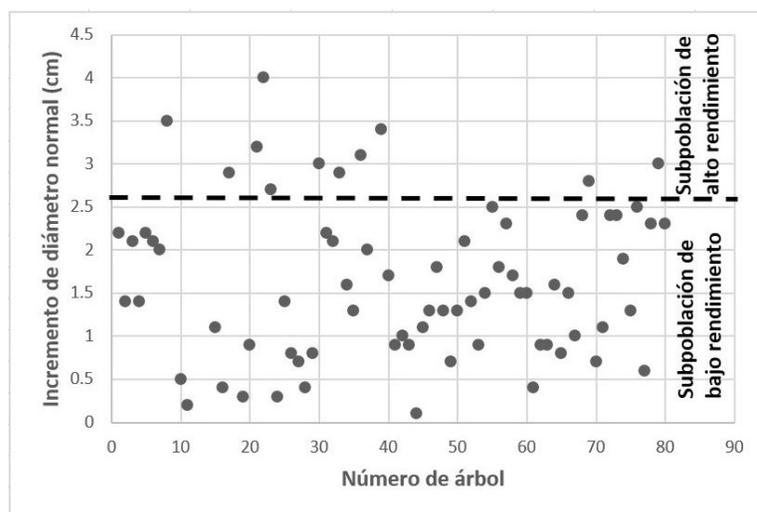


Figura 2. Incremento de diámetro alcanzado en siete meses del periodo de evaluación en las subpoblaciones de árboles de *Cedrela odorata* L.

El incremento de diámetro en el periodo de evaluación varió de 0.1 a 4.0 cm. La media de la subpoblación de alto rendimiento fue más del doble, comparada con la de bajo rendimiento (Cuadro 2).

Cuadro 2. Estadísticas descriptivas básicas relativas al incremento de diámetro a la altura del pecho en las subpoblaciones de alto y bajo rendimiento.

| Subpoblación | Número de muestras | Media | Valor mínimo | Valor máximo |
|---------------------|---------------------------|--------------|---------------------|---------------------|
| 1 | 11 | 3.1364 | 2.7 | 4.0 |
| 2 | 62 | 1.3597 | 0.1 | 2.5 |

La prueba de *t* para la comparación del Incremento de Diámetro a la Altura del Pecho (IDAP) en las subpoblaciones de alto y bajo rendimiento indica que son diferentes entre sí ($Pr > 0.0001$), lo que expresa que la media de la subpoblación de alto rendimiento es significativamente superior a la de bajo rendimiento (Cuadro 3).

Cuadro 3. Prueba de *t* para comparar el incremento de diámetro en las subpoblaciones de alto y bajo rendimiento.

| Método | Varianzas | G. L. | Valor de <i>t</i> | <i>Pr</i> > <i>t</i> |
|----------------------|------------------|--------------|--------------------------|----------------------------------|
| Agrupado | Igual | 71 | 8.6 | <0.0001 |
| <i>Satterthwaite</i> | No-igual | 23.066 | 12.6 | <0.0001 |

Los intervalos y las medias de las concentraciones de los nutrimentos estudiados en follaje de cedro rojo se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Concentraciones nutrimentales foliares en la población completa de árboles de *Cedrela odorata* L.

| Nutrimento | Intervalo de concentración | Concentración media |
|-------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| N (%) | 0.56-3.78 | 1.94 |
| P (%) | 0.082-0.25 | 0.14 |
| K (%) | 0.26-2.28 | 0.83 |
| Ca (%) | 0.58-3.17 | 1.71 |
| Mg (%) | 0.079-0.38 | 0.22 |
| B (ppm) | 14.7-108.3 | 41.0 |
| Cu (ppm) | 0.95-6.08 | 3.04 |
| Fe (ppm) | 38-417 | 102.0 |
| Mn (ppm) | 4.99-136.0 | 21.3 |
| Zn (ppm) | 11.1-39.6 | 24.2 |

Las concentraciones críticas nutrimentales consistieron en las medias de las concentraciones de cada nutrimento, asociadas a los 11 árboles de la subpoblación de alto rendimiento (Cuadro 5).

Cuadro 5. Concentraciones nutrimentales de los árboles correspondientes a la subpoblación de alto rendimiento y concentraciones críticas para árboles de *Cedrela odorata* L. de medio turno.

| IDAP | N (%) | P (%) | K (%) | Ca (%) | Mg (%) | B (ppm) | Cu (ppm) | Fe (ppm) | Mn (ppm) | Zn (ppm) |
|-------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 4.0 | 2.205 | 0.174 | 0.720 | 1.708 | 0.258 | 19.59 | 1.83 | 202.10 | 30.06 | 31.53 |
| 3.5 | 1.75 | 0.176 | 0.901 | 1.239 | 0.135 | 17.41 | 3.70 | 220.06 | 29.09 | 24.98 |
| 3.4 | 1.575 | 0.089 | 0.415 | 2.650 | 0.317 | 53.96 | 1.74 | 50.77 | 28.83 | 28.41 |
| 3.2 | 2.065 | 0.141 | 0.445 | 2.090 | 0.203 | 26.17 | 1.98 | 104.41 | 9.45 | 27.45 |
| 3.1 | 2.415 | 0.154 | 1.610 | 1.163 | 0.161 | 33.30 | 3.62 | 127.21 | 16.93 | 20.52 |
| 3.0 | 2.065 | 0.147 | 0.416 | 2.480 | 0.250 | 25.73 | 2.59 | 85.29 | 19.59 | 36.45 |
| 3.0 | 2.835 | 0.155 | 0.905 | 1.160 | 0.140 | 60.13 | 2.71 | 103.77 | 14.29 | 22.55 |
| 2.9 | 2.31 | 0.241 | 0.872 | 1.476 | 0.124 | 20.70 | 3.99 | 221.16 | 32.52 | 29.56 |
| 2.9 | 2.24 | 0.168 | 1.352 | 1.676 | 0.312 | 21.08 | 2.22 | 81.86 | 18.36 | 18.01 |
| 2.8 | 2.1 | 0.098 | 0.374 | 2.541 | 0.303 | 71.83 | 2.38 | 53.96 | 22.14 | 22.16 |
| 2.7 | 1.61 | 0.170 | 1.216 | 0.916 | 0.178 | 18.04 | 0.95 | 84.75 | 5.00 | 15.29 |
| CC | 2.106 | 0.156 | 0.839 | 1.736 | 0.216 | 33.45 | 2.52 | 121.39 | 20.57 | 25.17 |

IDAP = Incremento de diámetro a la altura del pecho (cm en el periodo de evaluación de 7 meses); CC = Concentración crítica nutrimental.

También, se generó un conjunto de normas DRIS (Cuadro 6) con las diferentes razones entre los valores medios y coeficientes de variación de los nutrimentos, correspondientes a la subpoblación de alto rendimiento, con 45 cocientes. En este

proceso, la unidad de concentración de macronutrientos fue siempre porcentual (%) respecto a la materia seca; mientras que los micronutrientos se usaron en ppm.

Cuadro 6. Conjunto de Normas DRIS para árboles de *Cedrela odorata* L. de medio turno.

| Razón | Valor | C.V. | Razón | Valor | C.V. | Razón | Valor | C.V. |
|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------|
| N/P | 14.24 | 25.57 | P/Mn | 20.57 | 41.48 | Mg/B | 0.01 | 46.15 |
| N/K | 3.12 | 45.37 | P/Zn | 0.01 | 34.83 | Mg/Cu | 0.10 | 52.40 |
| N/Ca | 1.38 | 39.11 | K/Ca | 0.61 | 69.86 | Mg/Fe | 0.00 | 73.52 |
| N/Mg | 11.09 | 42.94 | K/Mg | 4.59 | 61.44 | Mg/Mn | 0.01 | 63.37 |
| N/B | 0.08 | 37.71 | K/B | 0.03 | 63.75 | Mg/Zn | 0.01 | 41.40 |
| N/Cu | 0.94 | 34.03 | K/Cu | 0.39 | 79.20 | B/Cu | 14.97 | 59.26 |
| N/Fe | 0.02 | 42.25 | K/Fe | 0.01 | 54.72 | B/Fe | 0.41 | 96.41 |
| N/Mn | 0.13 | 59.41 | K/Mn | 0.06 | 105.81 | B/Mn | 2.00 | 61.12 |
| N/Zn | 0.09 | 28.34 | K/Zn | 0.04 | 66.97 | B/Zn | 1.41 | 59.41 |
| P/K | 0.22 | 35.86 | Ca/Mg | 8.25 | 23.90 | Cu/Fe | 0.02 | 41.28 |
| P/Ca | 0.11 | 45.98 | Ca/B | 0.06 | 38.60 | Cu/Mn | 0.14 | 37.33 |
| P/Mg | 0.85 | 53.64 | Ca/Cu | 0.79 | 46.57 | Cu/Zn | 0.10 | 37.62 |
| P/B | 0.01 | 53.58 | Ca/Fe | 0.02 | 77.35 | Fe/Mn | 6.99 | 57.58 |
| P/Cu | 0.07 | 52.88 | Ca/Mn | 0.10 | 52.89 | Fe/Zn | 4.90 | 43.49 |
| P/Fe | 0.00 | 28.62 | Ca/Zn | 0.07 | 29.97 | Mn/Zn | 0.81 | 35.43 |

C.V. = Coeficiente de variación

Verificación de las concentraciones críticas y normas DRIS en campo

De acuerdo al Cuadro 7, al aplicar al experimento de fertilización las concentraciones críticas en el presente estudio, el testigo absoluto presentó deficiencias de N, P, K y Mg; sin embargo, el nutrimento más deficiente fue K y el incremento de diámetro a la altura del pecho (IDAP) fue de 0.25 cm. Con base en este diagnóstico, se seleccionó un segundo tratamiento del experimento de fertilización (Cuadro 7), el cual aportó 600 g de sulfato de potasio y 600 g de urea. El análisis foliar indicó que su adición provocó un aumento de las concentraciones foliares de N y K. Al aplicar a este tratamiento las concentraciones críticas generadas, K resultó aún el nutrimento más deficiente, pero se contrarrestó la deficiencia de N; además aumentó el IDAP de 0.25 cm a 1.27 cm; es decir, se tuvo un aumento cinco veces superior al del testigo absoluto. Este incremento significa que las concentraciones críticas desarrolladas en el presente estudio predijeron correctamente el estado nutrimental del testigo absoluto.

Cuadro 7. Proceso de verificación de las concentraciones críticas nutrimentales para *Cedrela odorata* L. mediante un experimento de campo.

| Número | Tratamiento | | Concentración foliar (%) | | | | | Diagnostico por CC | | | | | IDAP (cm año ⁻¹) | |
|--------|-------------|-------|--------------------------|------|------|------|------|--------------------|----|----|----|----|---------------------------------|------|
| | P | K | N | N | P | K | Ca | Mg | N | P | K | Ca | | Mg |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1.70 | 0.13 | 0.34 | 2.69 | 0.17 | D | D | MD | S | D | 0.25 |
| 2 | 0 | 600 | 600 | 2.09 | 0.13 | 0.46 | 2.25 | 0.19 | S | D | MD | S | D | 1.27 |
| 3 | 0 | 1 340 | 600 | 2.00 | 0.14 | 0.41 | 1.93 | 0.17 | LD | LD | MD | S | D | 1.10 |
| 4 | 390 | 2 000 | 600 | 1.98 | 0.13 | 0.41 | 2.42 | 0.18 | D | LD | MD | S | D | 1.03 |

Núm. = Número de tratamiento; IDAP = Incremento de diámetro (cm año⁻¹); S = Suficiente; LD = Ligeramente deficiente; D=Deficiente; MD = Muy deficiente; Tratamiento de N, P y K en g de urea, ácido fosfórico y sulfato de potasio, respectivamente, aplicados por árbol.

A partir del diagnóstico del segundo tratamiento (Cuadro 7), se suministró un tercer tratamiento correspondiente a una mayor dosis de sulfato de potasio ($1\ 340\ \text{g}\ \text{árbol}^{-1}$), pero se mantuvo el nivel de fertilización con N (Cuadro 7).

Aun cuando la aplicación de sulfato de potasio y urea en el tratamiento tres no se manifestó en incrementos de las concentraciones de esos nutrientes, el IDAP disminuyó ligeramente con respecto al tratamiento dos (de $1.27\ \text{cm}\ \text{año}^{-1}$ a $1.10\ \text{cm}\ \text{año}^{-1}$). Es probable que esta ligera disminución de IDAP sea resultado de que el diagnóstico del tratamiento dos no se atendió estrictamente, ya que debió utilizarse, además de K (sulfato de potasio), una dosis de P (ácido fosfórico). Dicha respuesta de los árboles ratifica que el conjunto de concentraciones críticas generado predijo correctamente el estado nutricional del tratamiento dos (Cuadro 7).

Para atender, al menos parcialmente el diagnóstico del tratamiento tres, se implementó el tratamiento cuatro que incluyó $390\ \text{g}$ de ácido fosfórico (P) y $2\ 000\ \text{g}$ de sulfato de potasio (K); mientras se mantuvo el mismo nivel de N ($600\ \text{g}$ de urea), cuando su dosis debió incrementarse según el diagnóstico del tratamiento tres. Tampoco fue posible subsanar la deficiencia del Mg diagnosticada en este último, ya que el experimento no incluyó la aplicación de Mg. Dado que dicho tratamiento fue incapaz de satisfacer la deficiencia fuerte de K, así como las de N, P y Mg, el rendimiento disminuyó ligeramente, con respecto al tratamiento tres (de 1.10 a $1.03\ \text{cm}\ \text{año}^{-1}$).

En el tratamiento dos (Cuadro 7), al subsanar el K, que fue el más deficiente, se logró tener su mayor concentración foliar, a la vez que se obtuvo el más alto IDAP, lo que demuestra de manera consistente que las concentraciones críticas generadas son efectivas.

Al verificar la efectividad de las normas DRIS, con los índices DRIS del testigo absoluto o tratamiento uno (Cuadro 8), se determinó que el elemento más deficiente fue el K (menor índice DRIS; -27.09), seguido del N (-5.74), Mg (-3.52) y P (-1.56) (Cuadro 8); por lo que al adicionar el sulfato de potasio (tratamiento 2) y $600\ \text{g}$ de urea se redujo el índice del K (-15.91) y satisfacer la deficiencia del N (0.24), a lo que

el árbol reaccionó incrementando la concentración foliar de ambos y el IDAP de 0.25 a 1.27 cm.año⁻¹. Lo anterior indica que las normas DRIS generadas en el presente estudio predijeron correctamente el estado nutrimental del tratamiento uno.

Cuadro 8. Verificación de las normas DRIS mediante un experimento en campo.

| Número | Tratamiento | | | Concentración foliar (%) | | | | | Índice DRIS | | | | IDAP | |
|--------|-------------|-------|-----|--------------------------|------|------|------|------|-------------|-------|--------|-------|-------|------|
| | P | K | N | N | P | K | Ca | Mg | N | P | K | Ca | | Mg |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1.70 | 0.13 | 0.34 | 2.69 | 0.17 | -5.74 | -1.56 | -27.09 | 37.92 | -3.52 | 0.25 |
| 2 | 0 | 600 | 600 | 2.09 | 0.13 | 0.46 | 2.25 | 0.19 | 0.24 | -4.05 | -15.91 | 19.18 | 0.54 | 1.27 |
| 3 | 390 | 1 340 | 600 | 1.97 | 0.14 | 0.40 | 2.84 | 0.17 | -3.21 | -2.26 | -22.82 | 35.08 | -6.78 | 0.73 |

IDAP = Incremento de diámetro a la altura del pecho (cm-año⁻¹; 1.30 m)

En el tratamiento 3 (Cuadro 8) se aplicaron los nutrimentos diagnosticados como deficientes en el tratamiento dos, manteniéndose el nivel de aplicación de 600 g de urea (N), sin mejorar el índice DRIS de K, pero sí el de P; además, apareció una deficiencia importante de Mg, nutrimento que no se manejó en el experimento de fertilización, lo que condujo a una disminución del rendimiento, con respecto al tratamiento dos.

Con base en la información del Cuadro 8, el valor más alto del índice DRIS de K (-15.91) correspondió al mayor IDAP (tratamiento 2), lo que puede significar que el K es el nutrimento más deficiente, como lo diagnosticó la norma DRIS generada en este estudio. Con esos resultados, es posible aseverar que el conjunto de normas DRIS desarrollado en el presente trabajo predice correctamente el estado nutrimental de árboles de *C. odorata* de medio turno.

A partir del proceso de verificación de las normas DRIS en el sitio de plantación, el nutrimento más deficiente fue el K, también se presentan deficiencias de P, Mg y N.

Por otro lado, en el sitio de estudio existen condiciones del suelo que limitan la disponibilidad de algunos nutrimentos, especialmente P y K. Aparentemente, ocurre un efecto de antagonismo entre el N y el K, mismos que en el suelo compiten por sitios de adsorción (Mengel y Kirkby, 1982), lo cual provoca lixiviación de uno de ellos, o de ambos.

Discusión

Las concentraciones críticas nutrimentales obtenidas en el presente estudio (Cuadro 5) fueron en el caso del N (2.106 %), valor que está en el intervalo indicado por Drechsel y Zech (1991) para *C. odorata*, como de concentración intermedia para la especie (2 años de edad). Ramírez *et al.* (2018) registraron concentraciones foliares de N (no concentraciones críticas) de 2 a 17 años de edad, superiores a la concentración crítica de N definida en la investigación que aquí se documenta de 0.156 %, la cual es baja comparada con la consignada por Drechsel y Zech (1991) de 0.23 %, pero similar a la citada por Ramírez *et al.* (2018). Los resultados evidenciaron una concentración crítica para K de 0.839 %, comparable a las señaladas por Calixto *et al.* (2015) en varios tratamientos de fertilización. Sin embargo, Drechsel y Zech (1991) determinan una concentración óptima de 0.244 % para K, misma que es muy baja comparada con la definida en el presente estudio.

La concentración crítica de Ca obtenida para *C. odorata* en Venustiano Carranza, Puebla fue más de seis veces superior a la propuesta por Drechsel y Zech (1991): 1.736 % vs. 0.179 %. En el caso de Mg, la concentración crítica determinada es parecida a la recomendada por Drechsel y Zech (1991), 0.24 vs. 0.2163 %. Para micronutrimentos, Drechsel y Zech (1991) consignan 25 ppm para Mn, 148 ppm de Fe y 15 ppm de Zn; los valores correspondientes estimados en esta investigación fueron 20, 121 y 25, para Mn, Fe y Zn, respectivamente.

Las concentraciones críticas predicen correctamente el estado nutrimental de los árboles de *C. odorata*; no obstante que en algunos pasos del proceso de verificación, los tratamientos de fertilización disponibles dentro del experimento, no permitieron corregir puntualmente todas las deficiencias detectadas. Cabe destacar que la incapacidad del tratamiento cuatro para subsanar las deficiencias de K, N y P, aun cuando fueron aplicados, probablemente se debe, en el caso de K, al conocido efecto de antagonismo entre N y K (Mengel y Kirkby, 1982). La permanencia de la deficiencia de P, pese a que se aplicó en el tratamiento cuatro, puede deberse al elevado contenido de calcio (Ca) en el suelo (8 840 ppm) y a que el pH del mismo es alto (7.72), en cuya condición ocurre la formación de fosfatos de calcio que precipitan a horizontes profundos del suelo, quedando no disponibles para el árbol (Montero-Solís *et al.*, 2019).

El conjunto de normas DRIS predijo correctamente el estado nutrimental; aunque, en el tratamiento 3 surgió el problema, aparentemente, de baja disponibilidad de los nutrientes aplicados (P y K). Es probable que la deficiencia de K no se haya subsanado, debido a que en el tratamiento tres se aplicó también N, nutriente que no era deficiente y que con frecuencia es antagónico con el K en el suelo (Mengel y Kirkby, 1982).

En el sitio de estudio se identificó una baja disponibilidad generalizada de P, la cual aparentemente se produce al reaccionar este elemento con el Ca, nutriente que presenta una gran concentración (8 840 ppm) en el suelo, acompañada de un valor alto de pH (7.72). En estas condiciones, es frecuente la formación de fosfatos de calcio en el suelo (da Silva y Fitzsimmons, 2016; Montero-Solís *et al.*, 2019), los cuales se precipitan hacia horizontes profundos disminuyendo la disponibilidad de P.

Es importante hacer notar que las normas DRIS y concentraciones críticas generadas deben considerarse preliminares, toda vez que fueron derivadas de una base de datos relativamente pequeña (74 árboles); no obstante, la capacidad predictiva de dichos estándares nutrimentales es perfectible, los procesos de verificación de los mismos, indicaron que es buena su capacidad predictiva del estado nutrimental de árboles de cedro de medio turno.

Conclusiones

Se presenta un conjunto de concentraciones críticas nutrimentales y uno de normas DRIS para concentraciones foliares de 10 nutrimentos en árboles de *Cedrela odorata* de medio turno (10 años de edad, aproximadamente).

Las concentraciones críticas nutrimentales y normas DRIS derivadas del estudio predicen correctamente las deficiencias nutrimentales en árboles de *C. odorata* de medio turno y son ideales para determinar su estado nutrimental durante las etapas fenológicas correspondientes a la mencionada edad y categorías diamétricas de 15 a 19 cm.

La plantación de *C. odorata* en la que se hizo la verificación de los conjuntos de concentraciones críticas y normas DRIS tiene deficiencias severas de K y ligeras de N, Mg y P.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), por el financiamiento, a través de una beca, de los estudios de Maestría en Ciencias del primer autor. Al Dr. Lourival Domingos Possani Postay por facilitar el sitio experimental.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Luis Alberto Parra Piedra: redacción, recolecta y análisis de datos de campo, subsidio parcial del estudio; Miguel Ángel López López: redacción, recolecta y análisis de datos de campo, subsidio parcial del estudio, revisión del documento, envío de artículo a la revista; Armando Gómez Guerrero: recolecta y análisis de datos de campo, redacción y revisión del documento; Víctor Manuel Ordaz Chaparro: recolecta y análisis de datos de campo, redacción y revisión del manuscrito.

Referencias

- Beaufils, E. and M. Sumner. 1976. Soil and plant factors in their effects on yield of sugarcane. Proceedings of The South African sugar technologists Association: 118-124. <https://pdfs.semanticscholar.org/ceff/0d652ea736805de11f24b495abd4a0060487.pdf> (12 de febrero de 2019).
- Brown, A. y S. Pacheco. 2006. Ecología y producción de cedro (género *Cedrela*) en las Yungas australes. Ediciones del Subtrópico, Tucumán, Argentina, 224 p. https://www.researchgate.net/profile/Gustavo_Zuleta/publication/308420666_Incidencia_de_herbivoria_en_Cedrela_balansae/links/57e42d0908ae25aa0208dae4/Incidencia-de-herbivoria-en-Cedrela-balansae.pdf (15 de enero de 2018).
- Calixto, C. G., M. A. López, A. Equihua, D. E. Lira y V. M. Cetina. 2015. Crecimiento de *Cedrela odorata* e incidencia de *Hypsipyla grandella* en respuesta al manejo nutrimental. Bosque 36(2): 265-273. Doi: 10.4067/S0717-92002015000200012.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). 2017. Portal de geoinformación. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (3 de mayo de 2019).
- da Silva C., B. and K. Fitzsimmons. 2016. The effect of pH on phosphorus availability and speciation in an aquaponics nutrient solution. Bioresource Technology 219: 778–781. Doi. 10.1016/j.biortech.2016.08.079.
- Drechsel, P. and W. Zech. 1991. Foliar nutrient levels of broad-leaved tropical trees: A tabular review. Plant Soil 131: 29–46. Doi: 10.1007/BF00010417.
- López L., M. Á. 2005. Un procedimiento alternativo al tradicional para la medición de alturas con clinómetro. Madera y Bosques 11(2):69-77. Doi:10.21829/myb.2005.1121257.
- Medina M., M. C. y E. J. Medina M. 1992. Límite de rendimiento para dividir las dos subpoblaciones de las normas DRIS para nogal pecanero. Terra 10(2):193-200.

Medina-Morales, M. C. 2004. Normas DRIS preliminares para nogal pecanero. *Terra Latinoamericana* 22(4): 445-450. <http://www.redalyc.org/pdf/573/57311096008.pdf> (10 de octubre de 2018).

Mengel, K. and A. E. Kirkby. 1982. Principles of plant nutrition. International Potash Institute. Berne, Switzerland. 593 p.

Montero-Solís, F. M., M. A. López-López, M. Jiménez-Casas, V. M. Cetina-Alcalá, D. E. Platas-Rosado and C. J. López-Collado. 2019. *Gliricidia sepium* and Fertilization affect growth, nutrient status, and incidence of *Hypsipyla grandella* in *Cedrela odorata* plantation. *Agroforestry systems*, 93 (3): 813-823. Doi:10.1007/s10457-017-0175-5.

Moreno C., L. R., M. A. López L., E. Estañol B. y A. Velázquez M. 2002. Diagnóstico de necesidades de fertilización de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. en vivero mediante el DRIS. *Madera y Bosques* 8(1): 51-60. Doi: 10.21829/myb.2002.811305.

Muellner, A. N., T. D. Pennington and M. W. Chase. 2009. Molecular phylogenetics of neotropical cedreleae (mahogany family, Meliaceae) based on nuclear and plastid DNA sequences reveal multiple origins of "*Cedrela odorata*". *Molecular Phylogenetics and Evolution* 52(2): 461–469. Doi:10.1016/j.ympev.2009.03.025.

Osiecka, A., P. J. Minogue and E. D. Dickens. 2019. Guide to fertilization for pine straw production on coastal plain sites. IFAS Extention, FOR 327. Florida, USA. 12 p. <https://edis.ifas.ufl.edu/pdf/FR/FR39500.pdf> (2 de junio de 2018).

Pennington, T. D. y J. Sarukhan 1998. Árboles tropicales de México: manual para la identificación de las principales especies. 2ª edición. Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo de Cultura Económica. México, D.F., México. pp. 294-295.

Ramírez, D., A. Alvarado, C. Ávila, M. E. Camacho, J. Fernández, R. Murillo, L. Salazar y C. L. Sandí. 2018. Dinámica de la concentración y acumulación de nutrimentos en los componentes de la biomasa aérea de *Cedrela odorata* L. en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 42(1): 21-48. Doi: 10.15517/RAC.V41I1.32196.

Ramírez G., G. Vera C., F. Carrillo A. y O. S. Magaña T. 2013. El cedro rojo (*C. odorata*) como alternativa de reconversión en terrenos abandonados por la agricultura comercial en el sur de Tamaulipas. *Agricultura Técnica en México* 34(2): 243-250. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172008000200011 (15 de febrero de 2018).

R Project. 2017. The R Project for Statistical Computing. Version R-3.4.2 FOR Windows. Vienna, Austria. <https://www.r-project.org/about.html> (1 de octubre de 2017)

Russell, J. S., D. M. Cameron, I. F. Whan, D. F. Beech, D. B. Prestwidge and S. J. Rance. 1993. Rainforest trees as a new crop for Australia. *Forest Ecology and Management* 60(1-2): 41-58. Doi: 10.1016/0378-1127(93)90022-F.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). 2016. Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2015, Coyoacán, México.

<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/282951/2016.pdf>

(16 de febrero de 2018).

Walworth, J. L. and M. E. Sumner. 1987. The Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS), *Advances in soil science* (6). B.A. Stewart USDA Conservation & Production Research Laboratory. Bushland, TX, USA. 228 p.

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4612-4682-4_4

(5 de julio de 2017).

Wells, C. and L. Allen. 1985. When and where apply fertilizer? A loblolly pine management guide. Gen. Tech. Rep. SE-36. U.S.D.A. Forest Service. Asheville, NC, USA. 23 p. Doi: 10.2737/SE-GTR-36.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.