

## RESISTENCIA A BAJAS TEMPERATURAS EN *Pinus hartwegii* SOMETIDO A DIFERENTES TRATAMIENTOS CON POTASIO

### FROST RESISTANCE IN *Pinus hartwegii* SUBJECTED TO DIFFERENT POTASSIUM TREATMENTS

Y. Ramírez-Cuevas; D. A. Rodríguez-Trejo

División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México.  
Correo-e: [paradiso\\_perduto@live.com.mx](mailto:paradiso_perduto@live.com.mx); [dantearuro@yahoo.mx](mailto:dantearuro@yahoo.mx)

#### RESUMEN

Con el fin de mejorar la resistencia a bajas temperaturas, se probó la aplicación de diferentes concentraciones de Nitrato de Potasio a plantas en vivero de 13 meses de edad de *Pinus hartwegii* Lindl. Se estableció un diseño experimental en bloques completos al azar, con cuatro repeticiones. Los tratamientos fueron cinco aplicaciones complementarias de 180, 150 y 114 ppm K, este último es la fertilización regular en el vivero forestal, durante la fase de endurecimiento. Dieciséis brinzales de cada tratamiento fueron colocados en una cámara de ambiente controlado, donde se simuló una helada a -5 °C por 2 h. Después de ello se estimó visualmente el nivel de daño (%) en tallo y raíz, así como en follaje. Mediante un modelo logístico se obtuvo la probabilidad de sufrir daño por bajas temperaturas en las plantas de los distintos tratamientos. Este modelo de probabilidad de daño en tallo y raíz y el modelo para follaje resultaron significativos. En este último caso, a mayor potasio en los tratamientos, menor probabilidad de daño en los brinzales.

Recibido: 8 de septiembre, 2009  
Aceptado: 31 de octubre, 2009  
doi: 10.5154/r.rchscfa.2009.09.032  
<http://www.chapingo.mx/revistas>

#### PALABRAS CLAVE:

fertilización, nitrato de potasio, planta de calidad, resistencia a heladas.

#### ABSTRACT

In order to improve frost resistance in *Pinus hartwegii* Lindl, different concentrations of potassium nitrate were tested on 13-month-old seedlings in a forest nursery. An experimental design with randomized complete blocks was used, with four replications. The treatments consisted of five additional applications each of 180 ppm K, 150 ppm K, and 114 ppm K, the last being the regular fertilization dosage applied in the forest nursery during the hardening phase. Sixteen seedlings per treatment were placed in a controlled environment chamber, where they were exposed to a -5 °C frost for two hours. Afterwards, the damage level (%) in the stems, roots and foliage was visually estimated. Using a logistic model, the probability of the seedlings in each treatment suffering frost damage was obtained. Both this probability model for frost damage in stems and roots, and the one used for foliage were significant. In the latter, the higher the potassium dosage, the lower the probability of frost damage in the seedlings.

**KEY WORDS:** fertilization, potassium nitrate, seedling quality, frost resistance.

#### INTRODUCCIÓN

La nutrición afecta la resistencia de las plantas al estrés y a las enfermedades, así como los procesos fisiológicos (Krause, 1991) y la morfología; todo ello determina el estado de las plantas antes de que sean llevadas a la plantación (Rook, 1991). El aporte de nutrientes en vivero es quizá, junto con el manejo del riego, una de las prácticas culturales de mayor importancia en la producción de planta, especialmente en contenedor (Landis, 1989).

La calidad de planta puede ser evaluada mediante indicadores morfológicos, fisiológicos y vía realización de pruebas, el primer caso incluye mediciones de diámetro y

#### INTRODUCTION

Nutrition affects seedling resistance to stress and disease, as do physiological processes (Krause, 1991) and morphology; all these factors determine the state of the seedling prior to being taken to the plantation (Rook, 1991). The input of nutrients in the nursery is perhaps, together with irrigation management, one of the most important cultural practices in seedling production, especially in containers (Landis, 1989).

Seedling quality can be evaluated by morphologic and physiological indicators and by testing. The former includes, for example, diameter and height measurements, while the

altura, como ejemplo. El segundo, la concentración de nutrientes o de carbohidratos. Otras pruebas abarcan, por ejemplo, el crecimiento potencial de la raíz y la resistencia a frío (Rodríguez, 2007).

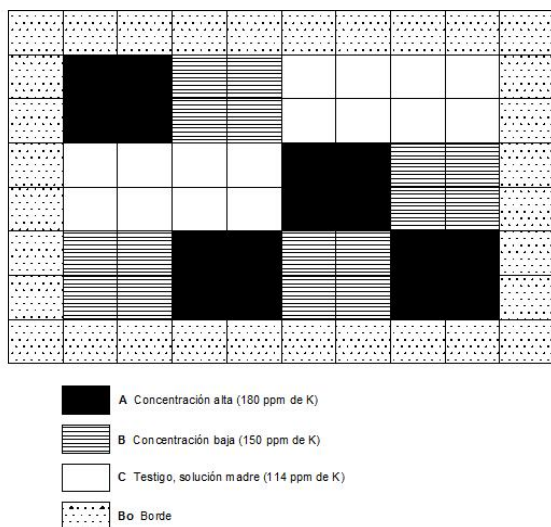
*Pinus hartwegii* Lind. se establece incluso en altitudes superiores a 4,000 m; para asegurar su supervivencia es deseable producir árboles más resistentes a factores adversos, como las heladas, con miras a aprovechar localidades difíciles, debido a su localización geográfica.

El objetivo del presente estudio, es demostrar que la fertilización con potasio, en concentraciones altas durante la producción en vivero de *Pinus hartwegii*, lo hace más resistente a bajas temperaturas, típicas de su ambiente.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se llevó a cabo en el vivero de la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo, en Chapingo, Estado de México. La planta fue producida con semilla procedente de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan en enero de 2005. Se utilizaron charolas con 50 cavidades y volumen individual de 135 cm<sup>3</sup>, las que se acomodaron formando un rectángulo de diez por ocho; se dejó una charola de borde en las hileras exteriores (Figura 1). Así, para la planta experimental se usaron en total 48 charolas. Se estableció un diseño experimental en bloques completos al azar, con cuatro repeticiones (bloques).

A brinzales de un año de edad en etapa de endurecimiento se le aplicaron tres tratamientos de



**FIGURA 1. Arreglo experimental con la distribución de los tratamientos de fertilización a plántulas de *Pinus hartwegii*.**

**FIGURE 1. Experimental arrangement with the distribution of the fertilizer treatments applied to *Pinus hartwegii* seedlings.**

latter involves the concentration of nutrients or carbohydrates. Other tests cover, for example, root growth potential and resistance to cold (Rodríguez, 2007).

## MATERIALS AND METHODS

This study was carried out in the Forestry Department greenhouse at the Universidad Autónoma Chapingo, in Chapingo, State of Mexico. The seedlings were produced with seeds from the Estación Forestal Experimental Zoquiapan (Zoquiapan Forest Research Station) in January, 2005. Trays with 50 cavities, each with an individual volume of 135 cm<sup>3</sup>, were used, arranged into a ten-by-eight rectangular shape with edge trays left around its outer circumference (Figure 1). Thus, a total of 48 trays, excluding those around the edge, were used in the seedling experiment. An experimental design of randomized complete blocks was used, with four replications (blocks).

Three fertilizer treatments were applied to one-year-old seedlings in the hardening phase: the regular greenhouse dosage and the other two with higher potassium nitrate (KNO<sub>3</sub>) concentrations. The first treatment was of 180 ppm K, and the second of 150 ppm K. As for the third treatment (the control), only the solution used in the nursery (20-07-19), 114 ppm K, was used.

The additional fertilizer was applied manually using a watering can. This activity was carried out within a month and a half, once a week. The treatment applications were completed in September, 2008. In each session, upon concluding the fertilizer application, a light watering was given to prevent the concentration of salts from damaging the needles.

In the laboratory, a cold test simulating frost conditions was carried out on a sample of 16 randomly-chosen seedlings per treatment, for a total of 48.

These seedlings were irrigated to field capacity and complete with rootball placed in the growth chamber. This test was a modified version of the method referred to by Glerum (1985). The seedlings were placed inside a Conviron® controlled environment chamber, inside of which the temperature was gradually reduced, at a rate of 5 °C per hour, from 20 °C to -5 °C. The chamber stayed at this temperature for two hours, after which the temperature was increased by 10 °C per hour until reaching room temperature. At the end of this stage, the seedlings were removed from their rootball substrate, placed in distilled water for three days and then assessed for damage by visually measuring the percentage of necrosis in foliage, roots and stems.

A logistic model was used to estimate the probability of damage by low temperatures in the seedling, as a function

fertilizante: el empleado regularmente en el vivero y adiciones de nitrato de potasio (KNO<sub>3</sub>) para elevar las concentraciones de potasio. El primer tratamiento de 180 ppm de K, el segundo, 150 ppm de K y al tercer tratamiento (testigo), sólo se le aplicó la solución utilizada en el vivero (20-07-19), con 114 ppm de K.

El fertilizante adicional se aplicó con una regadera mediante riegos manuales. Esta actividad se realizó en un lapso de mes y medio, una vez por semana. La aplicación de tratamientos se concluyó en el mes de septiembre de 2008. En cada sesión, al concluir la aplicación de fertilizante, se dio un riego ligero para evitar que la concentración de sales dañará las acículas.

En laboratorio se hizo una prueba de frío simulando una helada, a una muestra de 16 brinzales tomados al azar por tratamiento, para un total de 48.

Estos brinzales fueron regados a capacidad de campo y colocados con todo y cepellón en la cámara de crecimiento. Dicha prueba fue una modificación al método referido por Glerum (1985). Las plantas fueron colocadas dentro de una cámara de ambiente controlado marca Conviron® a la que se le redujo la temperatura gradualmente desde 20 °C, a razón de 5 °C por hora, hasta alcanzar -5 °C. La cámara permaneció con esa temperatura durante dos horas, después se aumentó a 10 °C cada hora, hasta alcanzar temperatura ambiente. Al término de esta etapa, a los brinzales les fue removido el sustrato del cepellón, se les colocó en agua destilada por tres días y se evaluó el daño, midiendo visualmente el porcentaje de necrosis en follaje, en raíz y tallo.

Se utilizó un modelo logístico para estimar la probabilidad de daño por bajas temperaturas en la planta, en función del tratamiento con potasio. El modelo se obtuvo de Hosmer and Lemeshow (2000):

$$P = 1 / (1 + e^{-(\alpha + \beta_1 X_1)}) \quad (1)$$

Donde:

P = Probabilidad de daño (en follaje, tallo y raíz, según el caso).

e = Base de los logaritmos naturales (=2.7182).

$\alpha$  = Constante.

$\beta$  = constante asociada a la variable X<sub>1</sub>.

X<sub>1</sub> = Nivel de potasio aplicado en la fertilización (ppm).

Para la comparación de variables morfológicas y de concentración nutrimental entre tratamientos se usó el modelo estadístico:

of the potassium treatment. The model was obtained from Hosmer and Lemeshow (2000):

$$P = 1 / (1 + e^{-(\alpha + \beta_1 X_1)}) \quad (1)$$

Where:

P = Probability of damage (in foliage, stem and root, according to the case).

e = Base of the natural logarithms (=2.7182).

$\alpha$  = Constant.

$\beta$  = Constant associated to the variable X<sub>1</sub>.

X<sub>1</sub> = Potassium level applied in the fertilization (ppm).

For comparing the morphological variables and nutrient concentrations among treatments, the following statistical model was used:

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

Where:

$\mu$  = Overall mean.

$\alpha_i$  = Effect of the i-th level of the potassium treatment.

$\beta_j$  = Effect of the j-th block.

$\varepsilon_{ij}$  = Experimental error.

For the analysis, a logistic procedure (Proc Logistic) from the SAS computer software package (Statistical Analysis System, The SAS Institute), version 9.0 for microcomputers, was used. In the case of analysis of variance, the SAS ANOVA procedure (Proc ANOVA) was employed. Comparisons between means were performed using the minimum significant difference test, with  $\alpha < 0.10$  being used in all cases.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Morphologic Variables

There were no differences in morphologic variables among treatments ( $P > 0.10$ ).

### Probability of root and stem damage

As for the frost test, 50 % of the seedlings in the least-K treatment (control) obtained some root and stem damage, followed respectively by the intermediate treatment with 31

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad (2) \quad \% \text{ and the most-K treatment with only 19 \%}.$$

Donde:

$\mu$  = Media general.

$\alpha_i$  = Efecto del i-ésimo nivel del tratamiento con potasio.

$\beta_j$  = Efecto del j-ésimo bloque.

$\varepsilon_{ij}$  = Error experimental.

Para el análisis se usó el procedimiento logístico (Proc Logistic) del paquete computacional SAS (Statistical Analysis System, The SAS Institute), versión 9.0 para microcomputadoras. En el caso del análisis de varianza se empleó el procedimiento ANOVA (Proc ANOVA) del SAS. Las comparaciones entre medias se realizaron con la prueba de diferencia mínima significativa. Se utilizó un  $\alpha < 0.10$  en todos los casos.

## RESULTADOS

### Variabes morfológicas

No se hallaron diferencias en ellas entre tratamientos ( $P > 0.10$ ).

### Probabilidad de daño en raíz y tallo

Del total de plantas analizadas en la prueba de heladas, en el tratamiento con menos K (testigo) se obtuvo 50 % de plantas con algún daño en la raíz y tallo, en el tratamiento intermedio 31 % y en el tratamiento con más K sólo 19 %.

Con la regresión logística, se generó el siguiente modelo predictivo:

$$P = 1 / (1 + 2.7182^{-(2.5309 - 0.0222 X_1)}) \quad (3)$$

Este modelo, que determina la probabilidad de daño en raíz y tallo, fue significativo ( $P = 0.0658$ ). La razón de momios resultó en 0.97, pero el intervalo de confianza abarcó de 0.955 a 1.001. En la representación gráfica del modelo anterior (Figura 2), se muestra la tendencia que presentan las plantas con la aplicación de potasio, en la cual a mayor concentración de nutrientes (ppm de K), menor la probabilidad de que presenten algún tipo de daño en raíz y tallo. De acuerdo al modelo señalado, las plantas con 114 ppm de K exhiben una probabilidad de ser dañadas en tallo y raíz igual a 50 %, en tanto que los árboles con 180 ppm K tienen 19 % de probabilidad de resultar dañados por una helada con la intensidad simulada en la prueba.

With logistic regression, the following predictive model was generated:

$$P = 1 / (1 + 2.7182^{-(2.5309 - 0.0222 X_1)}) \quad (3)$$

This model, which determines the probability of root and stem damage, was significant ( $P = 0.0658$ ). The odds ratio was 0.97, but the confidence interval ranged from 0.955 to 1.001. The graph representing the previous model (Figure 2) shows the tendency for potassium-treated seedlings. More specifically, the higher the concentration of nutrients (ppm K) in the seedlings, the lower the probability of their displaying some type of root and stem damage. According to the model indicated, seedlings with 114 ppm K have a 50 % probability of suffering stem and root damage, while trees with 180 ppm K have a 19 % probability of being damaged by a frost with the intensity simulated in the test.

### Probability of foliage damage

The foliage showed higher levels of damage, compared with the other parts analyzed. However, the seedlings recovered from damage in this part, so a 20 % necrosis level was used as the minimum for the model. Of the seedlings analyzed in the frost test, the percentage of seedlings with damage ( $\geq 20$  %) in their foliage was 73 % for the control, and 27 % for both the intermediate and high-K treatments. The model generated with the data analyzed is:

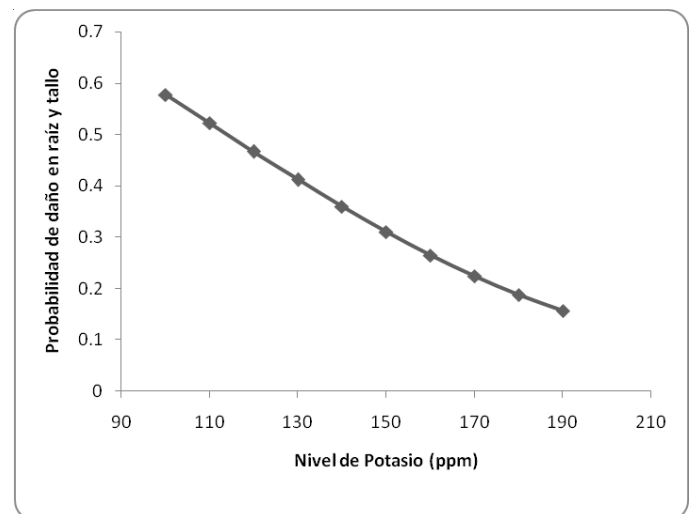


FIGURA 2. Probabilidad de daño en raíz y tallo con diferentes concentraciones de potasio en brinzales de 13 meses de edad de *Pinus hartwegii*.

FIGURE 2. Probability of root and stem damage with different concentrations of potassium in 13-month-old *Pinus hartwegii* seedlings.



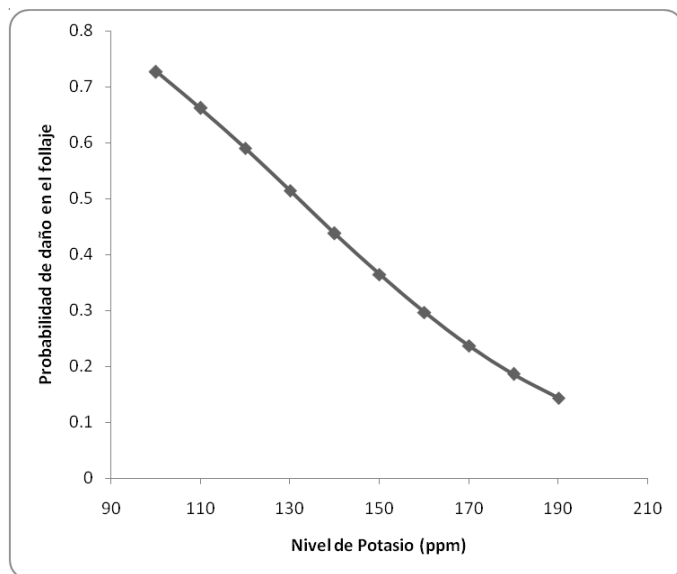
**Probabilidad de daño en follaje**

El follaje mostró mayores niveles de daño, en comparación con las otras partes analizadas. Sin embargo, las plantas se repusieron de daño en esa parte, por lo que se empleó un nivel de 20 % de necrosis como el mínimo al ser incluido en el modelo. De las plantas analizadas en la prueba de heladas, el porcentaje de brinzales con daño ( $\geq 20\%$ ) en el follaje alcanzó para los tratamientos testigo, intermedio y alto K, respectivamente: 73, 27 y 27 %. El modelo generado con los datos analizados es:

$$P = 1/(1 + 2.7812^{-(4.0488 - 0.0307 X_1)}) \quad (4)$$

El modelo fue significativo ( $P=0.0126$ ), la razón de momios fue 0.97 y el intervalo de confianza resultó de 0.947 a 0.993. A mayor nivel de potasio en la fertilización, durante la etapa de endurecimiento, menor probabilidad que el follaje de la planta resulte necrótico (Figura 3). De esta forma, si la fertilización es de 110 ppm K, luego de una helada con las características de la del experimento, la probabilidad de que las hojas resulten dañadas es 66 %; en cambio con una fertilización de 180 ppm K, la helada referida origina una probabilidad de daño en acículas igual a 19 %.

Se ha encontrado que *Pinus hartwegii* sufre menos daños por heladas que especies como *Pinus pseudostrobus*, *P. pseudostrobus* var. *apulcensis*, y *P. montezumae* (Viveros *et al.*, 2007). Sin embargo, en su ambiente las heladas son frecuentes y la fertilización con K puede ayudar a aumentar su resistencia ante tal factor limitativo.



**FIGURA 3. Probabilidad de daño en follaje con diferentes concentraciones de potasio en *Pinus hartwegii* de 13 meses de edad.**

**FIGURE 3. Probability of foliage damage with different concentrations of potassium in 13-month-old *Pinus hartwegii* seedlings.**

$$P = 1/(1 + 2.7812^{-(4.0488 - 0.0307 X_1)}) \quad (4)$$

The model was significant ( $P=0.0126$ ), the odds ratio was 0.97 and the confidence interval from 0.947 to 0.993. The higher the level of potassium in the fertilization, during the hardening phase, the lower the probability of the seedling foliage being necrotic (Figure 3). Thus, if the fertilization is 110 ppm K, following a frost with the characteristics of the one simulated in the experiment, the probability of the leaves being damaged is 66 %; on the other hand, with 180 ppm K fertilization, there is only a 19 % probability of the same frost damaging the needles.

*Pinus hartwegii* has been found to suffer less frost damage than species such as *Pinus pseudostrobus*, *P. pseudostrobus* var. *apulcensis*, and *P. montezumae* (Viveros *et al.*, 2007). However, in its environment, frosts are frequent and fertilization with K can help increase its resistance to such a limiting factor.

Lower susceptibility to low temperatures in seedlings with extra potassium is due to the fact that, upon entering the cellular metabolic system, this element forms salts with organic and inorganic acids, which serve to regulate osmotic potential, in turn controlling inner water content; in addition, K affects the opening and closing of stomata (Fisher and Hsiao, 1968; Humble and Hsiao, 1969; Rodríguez, 1999).

Seedlings that have an adequate K supply make more efficient use of water during stress, which bears a direct relationship to their resistance to frost and diseases (Barra, 1986; Jack, 1984). By comparison, when a potassium deficiency exists, decreased turgidity and water stress occurs, causing the plant to wilt. Drought resistance is thus reduced (Pissarek, 1973).

Seedlings affected by K deficiency show a higher susceptibility to frost damage, fungal attack and saline conditions (Landis, 1989). Potassium deficiencies imply reduced photosynthesis and increased respiration, lower synthesis and transfer of sugars, the presence of catabolic substances in cells, such as putrescine, which initiates processes of cell and tissue death, causing tissue necrosis (Rodríguez, 1999), as seen in this work. On the other hand, in some cases low K levels have been associated with greater frost resistance, and the explanation is also associated with putrescine production, as occurs with *Pinus sylvestris* L. (Jokela *et al.*, 1998).

In a similar study of 29-year-old *Picea abies* (L.) H. Karst., leaves with lower potassium levels were more susceptible to frost damage (Jönsson *et al.*, 2004). However, it should be recognized that other factors also influence frost hardiness, such as provenance. In the case of *P. hartwegii*, Viveros *et al.* (2009) have demonstrated that seedlings originating from higher altitudes better withstand

La menor susceptibilidad a bajas temperaturas en plantas con potasio adicional, obedece a que al entrar al sistema metabólico celular, este elemento forma sales con ácidos orgánicos e inorgánicos, mismas que sirven para regular el potencial osmótico, controlando a su vez el contenido de agua interna; además el K influye en la apertura y cierre de estomas (Fisher y Hsiao, 1968; Humble y Hsiao, 1969; Rodríguez, 1999).

Las plantas que muestran un adecuado suministro de K hacen un uso más eficiente del agua durante el estrés, teniendo una relación directa con la resistencia que presentan a las heladas y a las enfermedades (Barra, 1986; Jack, 1984). En cambio, cuando existe deficiencia de potasio se observa una disminución de la turgencia y tensión hídrica, que se convierte en flacidez. La resistencia a la sequía es por tanto reducida (Pissarek, 1973).

Las plantas afectadas por deficiencia de K, muestran una mayor susceptibilidad a daños por heladas, ataque de hongos y condiciones salinas (Landis, 1989). Las deficiencias en potasio implican reducción de fotosíntesis e incremento de respiración, menor síntesis y traslado de azúcares, presencia de sustancias catabólicas en las células, como la putresceína, que inicia procesos de muerte celular y tisular, esto es, genera necrosis de tejidos (Rodríguez, 1999), como la observada en el presente trabajo. Por el contrario, en algunos casos bajos niveles de K han sido asociados con mayor resistencia a heladas y la explicación también se asocia a la producción de putresceína, como acontece con *Pinus sylvestris* L. (Jokela et al., 1998).

De manera semejante al presente estudio, en *Picea abies* (L.) H. Karst. de 29 años, las hojas con menores niveles de potasio fueron más susceptibles a daños por heladas (Jönsson et al., 2004). No obstante, debe tenerse presente que hay otros factores que también influyen en la resistencia a heladas, como la procedencia. En el caso de *P. hartwegii*, Viveros et al. (2009) han demostrado que las procedencias de mayores altitudes resisten mejor las bajas temperaturas.

Sería conveniente probar el efecto de concentraciones aún mayores de potasio y observar el efecto de otros factores, como la procedencia, además de respuestas como la conductividad electrolítica, ante heladas simuladas semejantes a las de este trabajo o más intensas.

---

## CONCLUSIONES

La fertilización con potasio, confiere más resistencia ante bajas temperaturas a los brinzales de *Pinus hartwegii*.

Dicha fertilización adicional implicó menos daños en tallo y raíz, así como en las acículas de brinzales sometidos a heladas simuladas en cámaras de ambiente controlado.

low temperatures.

It would be useful to test the effect of even higher potassium concentrations and observe the effect of other factors, such as provenance, as well as responses such as that of electrolytic conductivity to frosts similar to, or even more intense than, those simulated in this study.

---

## CONCLUSIONS

Fertilization with potassium provides *Pinus hartwegii* seedlings with greater resistance to low temperatures.

This additional fertilization results in less damage to stems, roots and needles when the seedling is subjected to simulated frosts in controlled environment chambers.

---

## ACKNOWLEDGMENTS

The Universidad Autónoma Chapingo and its Forestry Division provided the financial support for this study. Mr. Gerardo Mendoza Ángeles kindly lent his professional skills to the laboratory stage, and Eng. Ruperto Vergara's assistance in the nursery phase was indispensable for the development of this work.

*End of English Version*

---



---

## AGRADECIMIENTOS

La Universidad Autónoma Chapingo y la División de Ciencias Forestales, proporcionaron el apoyo financiero para la realización del presente trabajo. El Sr. Gerardo Mendoza Ángeles, amablemente desplegó su capacidad de colaboración en la fase de laboratorio. La ayuda del Ing. Ruperto Vergara en la etapa de vivero, fue muy valiosa para el desarrollo del trabajo.

---

## LITERATURA CITADA

- BARRA T., S. 1986. Fertilización forestal. Departamento Forestal de Zonas Húmedas. Cancillería de Agricultura. Junta de Galicia, España. 143 p.
- FISCHER, R. A.; HSIAO, T. C. 1968. Stomatal opening in isolated epidermal strip of *Vicia faba*. II. Responses to KCl concentration and the role of potassium adsorption. *Plant Physiology* 43: 1953-1958.
- GLERUM, C. 1985. Frost hardiness of coniferous seedlings: principles and applications. In: Duryea, M. L. (ed.). *Proceedings: Evaluating seedling quality: principles, procedures and predictive abilities of major tests*. Oregon State University, Corvallis, Oregon. October 16-18, 1984. pp. 107-123.

- HOSMER, D. W.; LEMESHOW, S. 2000. Applied logistic regression. Wiley. New York. 392 p.
- HUMBLE, G. D.; HSIAO, T. C. 1969. Specific requirement of potassium for light-activated opening of stomata in epidermal strips. *Plant Physiology* 44: 230-234.
- JACK T., M. 1984. Nutrients and fertilization. *In: Southern Pine Nursery Handbook*. United States Department of Agriculture, Forest Service Southern Region. Atlanta, Georgia. pp. 12.1-12.38.
- JOKELA, A.; SARJALA, T.; HUTTUNEN, S. 1998. The structure and hardening status of Scots pine needles at different potassium availability levels. *Trees-Structure and Function* 12: 490-498.
- JÖNSSON, A. M.; INGERSIEV, M.; RAULUND-RASMUSSEN, K. 2004. Frost sensitivity and nutrient status in a fertilized Norway spruce stand in Denmark. *Forest Ecology and Management* 201: 199-209.
- KRAUSE, H. H. 1991. Nutrient form and availability in the root environment. *In: van den Driessche (ed.). Mineral nutrition of conifer seedlings*. CRC Press. USA. pp. 1-24.
- LANDIS, T. D. 1989. Mineral nutrients and fertilization. *In: Landis, T. D.; Tinus, R. W.; McDonald, S. E.; Barnett, J. P. (eds.). The container Tree Nursery Manual*. Vol 4. Agriculture Handbook 674. USDA Forest Service. pp. 1-70.
- PISSAREK, H. P. 1973. The development of potassium deficiency symptoms in spring rape. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk* 136: 1-96.
- RODRÍGUEZ S., F. 1999. Fertilizantes. *Nutrición vegetal*. AGT Editor. México, D. F. 15 p.
- RODRÍGUEZ T., D. A. 2007. Indicadores de calidad de planta forestal. *Mundi Prensa*. Universidad Autónoma Chapingo. México, D. F. 156 p.
- ROOK, D. A. 1991. Seedling development and physiology in relation to mineral nutrition. *In: van den Driessche, R. (ed.). Mineral nutrition in conifer seedlings*. CRC Press. USA. pp. 86-112.
- VIVEROS V., H.; SÁENZ R., C.; LÓPEZ U., J.; VARGAS H., J. J. 2007. Growth and frost damage variation among *Pinus pseudostrobus*, *P. montezumae* and *P. hartwegii* tested in Michoacán, México. *Forest Ecology and Management* 253: 81-88.
- VIVEROS V., H.; SÁENZ R., C.; LÓPEZ U., J.; VARGAS H., J. J.; RAMÍREZ V., G.; SANTACRUZ V., A. 2009. Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: Height growth, shoot phenology, and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management* 257: 836-842.