

**VALORACIÓN ECONÓMICA DE DOS PRÁCTICAS DE DESALINIZACIÓN: CASO
DE ESTUDIO VILLAMAR-MICHOACÁN, MÉXICO**

**ECONOMIC VALUATION OF TWO DESALINATION PRACTICES: CASE STUDY
VILLAMAR-MICHOACÁN, MEXICO**

Marcos Alfonso Lastiri Hernández, MSc.

Maestro en Ciencias en Administración de Negocios (México).

Maestro en Ciencias en Producción Agrícola y Sustentable (México).

Docente-investigador del Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Unidad Michoacán, México.

marcos.lastiri5@gmail.com

Salvador Ochoa Estrada, MSc.

<http://orcid.org/0000-0002-8933-2882>

Maestro en Ciencias en Edafología (México).

Docente-investigador del Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Unidad Michoacán, México.

sochoae@ipn.mx

Dioselina Álvarez Bernal, Ph.D.

<http://orcid.org/0000-0002-0434-5917>

Doctora en Biotecnología Ambiental (México).

Docente-investigador del Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Unidad Michoacán, México.

dalvarezb@ipn.mx

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Recibido: 4 de septiembre de 2020

Aceptado: 17 de septiembre de 2020

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar el costo que presenta la fitodesalinización respecto a la aplicación del yeso agrícola para rehabilitar una parcela con problemas severos de salinidad, a partir de las prácticas agrícolas, los precios de mercado y la infraestructura que disponen los productores del municipio de Villamar-Michoacán, México, para llevar a cabo su labor agrícola. Se hicieron recorridos de campo a los diferentes ejidos que conforman el municipio y se aplicaron 317 cuestionarios semiestructurados para conocer los elementos que se encuentran vinculados con su labor productiva. Para determinar el costo de la fitodesalinización, se consideró la producción de la biomasa, el manejo agronómico y el valor de la biomasa generada. En el caso del yeso agrícola, se consideraron cuatro aspectos: la preparación previa del suelo, la nivelación



del terreno, el manejo agronómico y los costos relacionados con la adquisición de la enmienda. Los resultados mostraron que el costo de la fitodesalinización fue 8.1% menor, en comparación con la aplicación del yeso agrícola, al presentar un valor de \$ 4,730.29 dólares por hectárea. Lo que demuestra que es una práctica agrícola sostenible, orientada a mejorar la economía de los productores, principalmente, cuando se busca implementar a gran escala.

Palabras clave: Fitodesalinización, *Sesuvium verrucosum*, Suelos salinos, Yeso agrícola.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the cost of phytodesalination with respect to the application of agricultural gypsum to rehabilitate a plot with severe salinity problems, based on agricultural practices, market prices and the infrastructure available to producers in the municipality from Villamar-Michoacán, Mexico, to carry out his agricultural work. Field trips were made to the different ejidos that make up the municipality and 317 semi-structured questionnaires were applied to find out the elements that are linked to their productive work. To determine the cost of phytodesalination, the biomass production, agronomic management and the value of the biomass generated were considered. In the case of agricultural gypsum, four aspects were considered: the previous preparation of the soil, the leveling of the land, the agronomic management and the costs related to the acquisition of the amendment. The results showed that the cost of phytodesalination was 8.1% lower, compared to the application of agricultural gypsum, presenting a value of \$ 4,730.29 dollars per hectare. Which shows that it is a sustainable agricultural practice, aimed at improving the economy of producers, mainly when it is sought to implement on a large scale.

Keywords: Gypsum, Phytodesalination, Saline soils, *Sesuvium verrucosum*.

INTRODUCCIÓN

Se estima que alrededor de 800 millones de hectáreas en todo el mundo están siendo afectadas por la salinidad y cada año que pasa se vuelven más improductivas por el efecto de su acumulación (Nikalje et al., 2018). El riego inadecuado, el agua de baja calidad y el uso excesivo de fertilizantes químicos son las principales causas de la salinidad del suelo; hecho que, se agrava, cuando imperan condiciones ambientales de escasa precipitación y mayor insolación, al suscitar severos procesos de degradación en el suelo (Ruiz y Terenti, 2012).

Los cultivos expuestos a la salinidad exhiben una serie de efectos perjudiciales como: a) estrés iónico, b) estrés osmótico, c) interrupción de la homeostasis y una serie de cambios morfológicos, fisiológicos y bioquímicos, que afectan de manera adversa la adquisición de

nutrientes y la transpiración y función del aparato fotosintético (Munns y Tester, 2008), lo cual se ha traducido en bajos rendimientos, pérdidas económicas y, en el peor de los casos, el abandono de las tierras de cultivo (Manzano-Banda et al., 2014).

Para superar esta situación de adversidad, se han propuesto diversos métodos físicos, químicos y agrotécnicos como alternativas de solución a dicha problemática, como es el caso del lavado del suelo, la construcción de obras de drenaje, el uso de enmiendas químicas basadas en el empleo de sales cálcicas de alta solubilidad ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; CaCO_3), el azufre elemental (S), así como la aplicación de ácidos (H_2SO_4) y de materia orgánica proveniente de diferentes fuentes (Welegedara et al., 2020).

La aplicación del yeso agrícola ha tenido una amplia aceptación entre los productores de diversas partes del mundo, debido a los múltiples beneficios que aporta a la rehabilitación de los suelos degradados por efectos de la salinidad, como son: a) mejorar las características físicas y químicas de los suelos, b) aumentar los niveles de aireación y penetración del agua en el suelo, c) promover una mayor estimulación de la actividad microbiana y con ello, un mejor aprovechamiento de nutrientes esenciales (*i.e.* nitrógeno y fósforo), d) incrementar la estabilidad de la materia orgánica del suelo y, e) reducir la dispersión de arcillas y el sellamiento superficial (Kim et al., 2018).

En las últimas décadas ha tenido auge un método biológico llamado fitodesalinización (Nouri et al., 2017), que consiste en el uso de la capacidad de ciertas especies halófitas para extraer grandes cantidades de sodio (Na^+) del ambiente afectado y retirarlo del mismo a través de diferentes estrategias, entre las que se encuentran: la exclusión, la excreción y acumulación, según las especies que se utilicen (Hasanuzzaman et al., 2014).

Si bien, existen diversas investigaciones que señalan los beneficios de la fitodesalinización en una amplia gama de especies halófitas alrededor del mundo (Nikalje et al., 2018), hasta el momento son pocos los estudios que analizan su viabilidad económica (Quillérrou y Thomas, 2012; Qadir et al., 2014), principalmente, porque la valoración se encuentra supeditada a diversos factores, entre los que destacan: a) el grado de afectación del suelo (pH, conductividad eléctrica y estructura del suelo), b) la duración del proceso (meses o años), c) las condiciones bióticas y abióticas de la zona (variaciones de temperatura, nutrientes, precipitación, humedad, patógenos y herbivoría de plantas) y d) el potencial de las propias halófitas para acumular sodio (Rabhi et al., 2010).

Por tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el costo que presenta la fitodesalinización respecto a la aplicación del yeso agrícola para rehabilitar una parcela con problemas severos de salinidad, a partir de las prácticas agrícolas, los precios de mercado y la infraestructura que

disponen los productores del municipio de Villamar, Michoacán, México, para llevar a cabo su labor agrícola.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del caso de estudio

El caso de estudio parte de un proyecto de investigación-desarrollo (CONACYT PN-2015-1-1165) que fue realizado en una parcela ubicada en el municipio de Villamar, Michoacán México (Lastiri et al., 2020); zona en la que gran parte de sus suelos, presentan problemas moderados y severos de salinidad (Anaya-Flores et al., 2018; Silva-García et al., 2006).

Además, se caracteriza por presentar un clima templado, con lluvias en el verano, así como una temperatura anual que oscila entre 12 y 18 C y una precipitación media anual de 900 mm (García, 1998).

Parte del proyecto consistió en evaluar la capacidad fitodesalinizadora de una especie halófitas llamada *Sesuvium verrucosum* durante un periodo de 240 días, en época de estiaje (del mes de octubre al mes de mayo). Esta especie es una arvense, dicotiledónea C3 de la familia Aizoaceae (Kocacinar y Sage, 2003), la cual posee una vasta plasticidad fenotípica a las condiciones del lugar (Lastiri et al., 2019) y cierto valor como especie forrajera, ornamental y para el consumo humano (Hasanuzzaman et al., 2014; Taha y Alsayed, 2000).

Antes de implementar la fitodesalinización en la parcela, el suelo mostraba los siguientes parámetros de salinidad: textura arcillosa (arcilla 63%, limo 14%, arena 23%), conductividad eléctrica E_{Ce} de 11.18±0.26 dS m⁻¹, pH de 7.84±0.05., relación de adsorción de sodio (RAS) de 38.78±0.10 (mmol_c L⁻¹)^{1/2}, capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 68.27±0.19 cmol_c kg⁻¹ y porcentaje de sodio intercambiable (ESP) de 42.18±0.26.

El suelo fue sometido a distintas prácticas de laboreo tradicionales, entre ellas: el barbecho, rastreo y surcado de forma manual. El peso fresco inicial de las halófitas al momento de su trasplante en la parcela fue de 50 ± 3.17 g planta⁻¹ (equivalente a 8.95 ±0.28 g planta⁻¹ de peso seco).

Para realizar la fitodesalinización se propuso que la separación entre los surcos fuera de 83 cm, con una altura de 20 cm, y que el espaciamiento entre las halófitas trasplantadas tuvieran una separación de 41.5 cm, a fin de obtener una densidad de 29,031 halófitas por ha⁻¹. También, se buscó que las halófitas recibieran un riego semanal de 3.125 litros/planta.

Las características físicoquímicas del agua de riego fueron: E_{Ce} de 0.5 ±0.04 dS m⁻¹, pH de 8.81, RAS de 1.93±0.13, Sólidos disueltos totales (SDT) de 155 ±12 mg L⁻¹, Ca²⁺ de 0.42 ±0.02 mmolc L⁻¹, Mg²⁺ de 3.61 ±0.14 mmolc L⁻¹, Na⁺ de 2.75 ±0.13 mmolc L⁻¹, K⁺ de 0.26 ±0.03 mmolc

L⁻¹, Carbonatos (CO₃²⁻) de 1.47±0.05 mmolc L⁻¹, Bicarbonatos (HCO₃³⁻) de 5.01±0.16 mmolc L⁻¹ y Sulfatos (SO₄²⁻) de 0.153 ±0.08 mmolc L⁻¹.

El control de las malezas se llevó a cabo de forma manual, se realizaron dos podas a las halófitas (al tercer y sexto mes) con el propósito de que no se perdiera la configuración de los surcos durante su crecimiento. En cada poda, se pesó y registró el material vegetal extraído y se adicionó al peso fresco final alcanzado por estas halófitas para una mejor cuantificación de la fitodesalinización. Al término de la primera etapa del proyecto, se realizó un análisis químico al suelo y a las plantas halófitas utilizadas mediante espectroscopia de absorción atómica (Allen, 1989).

La capacidad de fitodesalinización de *S. verrucosum* se cuantificó a partir de la cantidad de sodio acumulada en la parte aérea de sus tejidos y del peso seco logrado a los 240 días después de su trasplante en la parcela (Rabhi et al., 2010).

Al término de 240 días pudo observarse que la especie *S. verrucosum* mejoró las propiedades químicas del suelo respecto a su condición inicial, principalmente en los primeros 30 cm de profundidad; por lo que, después de implementar la fitodesalinización en la parcela, el suelo mostró las siguientes características: E_{Ce} de 7.34 ±0.31 dS m⁻¹, pH de 7.58 ±0.05., RAS de 24.77 ±0.86 (mmol_c L⁻¹)^{1/2}, CIC de 70.98 ±0.91 cmol_c kg⁻¹ y porcentaje de sodio intercambiable (ESP) de 22.89 ±1.41.

También, pudo observarse que *S. verrucosum* logró un peso fresco de 3980.76 ±110.70 g planta⁻¹, equivalente a un peso seco de 15.83 ± 0.30 Mg ha⁻¹, así como una capacidad de fitodesalinización de 33.33 g planta⁻¹, equivalente a 0.96 ±0.036 Mg ha⁻¹.

Aplicación del yeso agrícola

Para poder comparar el costo de la fitodesalinización respecto a la aplicación del yeso agrícola, se cuantificó la cantidad de yeso agrícola que sería requerido para reducir a un mismo nivel la salinidad del suelo de la parcela descrita en la sección anterior, es decir, a profundidad de 30 cm, donde se registraron los mejores resultados con la implementación de la fitodesalinización.

Para determinar la cantidad de yeso requerido para la recuperación del suelo (GR) se utilizó la fórmula propuesta por Rasouli et al. (2013), (Eq. (1)):

$$GR = (ESP_i - ESP_f)(CEC)(Bd)(D)(F)(0.00086) \quad (1)$$

Donde, GR= el requerimiento del yeso agrícola en el suelo (Mg ha⁻¹); ESP_i = el porcentaje de sodio intercambiable inicial del suelo; ESP_f = el porcentaje de sodio intercambiable final del suelo; CEC = la capacidad de intercambio catiónico del suelo (cmol_c kg⁻¹); Bd = la densidad aparente

del suelo (g cm^{-3}); D = la profundidad del suelo a recuperar (cm), F = la eficiencia del Ca^{2+} para intercambiarse con el Na^+ (en este caso, se asume como 1).

Por tanto, se buscó reducir el nivel de salinidad de 11.13 dSm^{-1} a 7.34 dSm^{-1} , esto requirió pasar de un ESP inicial del 42.18% a un ESP final del 22.89%, tomando en cuenta que la capacidad de intercambio catiónico del suelo de la parcela registró un valor de $68.27 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ y una densidad aparente de 1.2 g cm^{-3} (Lastiri et al., 2020). Lo que representó una cantidad de yeso agrícola de 40.77 Mg ha^{-1} .

De acuerdo con las prácticas agrícolas que se realizan en el municipio de Villamar, el yeso agrícola se incorpora por medio de un paso de rastra después de su aplicación terrestre, previo a ello, se realiza la preparación del suelo mediante barbecho (cortar, voltear, pulverizar el suelo, incorporar residuos de cosechas anteriores y aflojar la capa arable) y rastreo (reducir al mínimo los agregados formados durante el barbecho), finalmente, se procede al riego por inundación.

Para conocer la lámina de riego que se requiere aplicar para lavar el suelo salino al encontrarse mezclado con el yeso agrícola, se utilizó la fórmula propuesta por Aceves (2011), (Eq. (2)):

$$LR = (CC - PMP)(DA)(PR) \quad (2)$$

Donde, LR = lamina de riego (cm); CC = capacidad de campo; PMP = punto de marchitamiento permanente; DA = densidad aparente del suelo ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) y PR = profundidad (cm)

Las Eq. (3) y (4) se utilizaron para calcular la CC y el PMP , respectivamente.

$$CC \%ps = 21.977 - 0.186 (\% \text{ arena}) + 2.601 (\% \text{ MO}) + 0.127 (\% \text{ arcilla}) \quad (3)$$

$$PMP \%ps = -5 + [(0.74) (CC \%ps)] \quad (4)$$

Puesto que se pretende abatir la salinidad a un nivel de 7.34 dS m^{-1} , se consideró una CC de 36.9; un PMP de 22.3; una DA de 1.2 g cm^{-3} y una PR de 30 cm. Por tanto, la lámina de riego debe ser de 52.56 cm., que en volumen representa $5256 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Evaluación de costos

Para estimar el costo de las dos prácticas de desalinización, se tomó como base de escala una hectárea, además, se partió de las siguientes premisas:

a) la calidad química del agua de riego y las propiedades fisicoquímicas del suelo de la parcela bajo análisis, son las mismas que las descritas en el caso de estudio, b) la parcela pertenece al productor, por lo que se descarta el pago por alquiler, c) la parcela cuenta con un entarquinamiento de 0.5 m de altura en sus aristas, así como un sistema de drenaje en la parte baja del terreno de 1.5 m; por lo cual, el costo de su construcción fue omitido, d) el acceso al

agua de riego se obtiene a través de la renta de un pozo que proporciona un gasto de 0.08 m³/s, e) la parcela cuenta con la infraestructura necesaria para la conducción y distribución del agua de riego sobre la parcela (*i.e.* una manguera de lona plana de 20.32 cm de diámetro para captar el agua desde el hidrante y tubos de PVC con compuertas incluidas), f) el transporte, maquinaria y los insumos requeridos para realización de ambas prácticas son de la misma marca y capacidad de operación para evitar sesgos en el costo por este rubro, g) el material vegetal se obtiene a partir de la propagación asexual (esquejes) de la especie *S. verrucosum*, considerando una duración para su establecimiento de 45 días, h) la propagación asexual se realiza en la propia parcela del productor.

Precios de mercado en la zona de estudio

Para conocer los precios de mercado promedio que se manejan en la zona, respecto a la mano de obra, insumos agrícolas, maquinaria y equipo que se requiere para la implementación de estas dos prácticas de desalinización, se hicieron recorridos de campo a los diferentes ejidos que conforman el municipio de Villamar y se aplicó un cuestionario semiestructurado, entre el mes de noviembre de 2019 y febrero del 2020.

El marco de muestreo comprendió 1,788 agricultores pertenecientes al municipio de Villamar que se encuentran registrados en el Programa Directo de Apoyo al Campo (PROCAMPO, 2013).

El tamaño de muestra se determinó a través de la fórmula propuesta por Gaitán y Pachón (2010), (Eq. (6)):

$$n = \frac{Z^2 pqN}{(NE^2 + Z^2 pq)} \quad (6)$$

Dónde: n = tamaño de la muestra; Z = nivel de confianza, 95% (1.96); p = variabilidad positiva, 50%; q = variabilidad negativa, 50%; N = tamaño de la población (7,865); E = la precisión o el error, 5%.

Por consiguiente, el tamaño de muestra fue de 317 agricultores (n=317), de acuerdo con el nivel de confianza y precisión establecidos.

Costo de la fitodesalinización

Para determinar el costo de la fitodesalinización, se utilizó la siguiente expresión matemática (Robinson et al., 2003), (Eq. (5)):

$$V = A \times \int_0^t (C_1 + C_2) - (P_1 \times V_1) dt \quad (5)$$

Dónde: V = El costo de la fitodesalinización (USD \$); A = área total (ha); C_1 = costo de producción de la biomasa (USD \$/ha); C_2 = costo operativo en campo (USD \$/ha); P_1 = la producción de biomasa vendible (Mg/ha); V_1 = el valor de la biomasa (USD \$/Mg).

Para estimar los costos asociados a la producción de la biomasa, se consideraron dos aspectos: 1) la propagación de las halófitas a través de esquejes, que incluye la mano de obra de los jornaleros, insumos (fertilizantes, botellas de Politereftalato de etileno [PET], enraizadores, suelo de baja conductividad eléctrica) y los gastos relacionados con la transportación y recolección, tanto del suelo como de las plantas madre de *S. verrucosum* en campo; 2) el manejo agronómico, que incluye que incluye la mano de obra de los jornaleros para realizar la fertilización y los riegos a los esquejes.

En cuanto a los costos operativos en campo, se consideraron tres aspectos: 1) la maquinaria agrícola y los accesorios que se requieren para la preparación previa del suelo; 2) la mano de obra requerida para el trasplante de las halófitas en la parcela; 3) el manejo agronómico de las halófitas, que incluye la renta de infraestructura para la realización de los riegos, de acuerdo con el tiempo de riego aplicado.

La producción de biomasa vendible se consideró de 15.83 ± 0.30 Mg ha⁻¹, de acuerdo con los hallazgos de Lastiri et al. (2019).

El valor de la biomasa, se estableció a partir del costo promedio que tienen las especies forrajeras más representativas en la zona de estudio, ya que la halófitas puede servir como un bien sustituto de estas; principalmente, en la época de estiaje.

Costo del yeso agrícola

Para determinar el costo del yeso agrícola se consideraron cuatro aspectos: 1) el costo de la preparación previa del suelo, que incluye el uso de maquinaria agrícola y los accesorios requeridos para su implementación (*i.e* arado de reja reversible, rastra de discos); 2) el costo de la nivelación del terreno, que incluye el uso de maquinaria agrícola y accesorios especializados para su realización; 3) el costo del manejo agronómico, que incluye la renta de infraestructura para la realización de los riegos; 4) los costos fijos, que incluyen el precio de la enmienda química, transporte, mano de obra y la maquinaria agrícola necesaria para su aplicación en la parcela (Ghafoor et al., 2001; Reyes et al., 2014; Trasviña-Barriga et al., 2018).

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Costo de la fitodesalinización

La tabla 1, muestra la estructura de los costos asociados con la producción de la biomasa de la especie *S. verrucosum*, a través de esquejes.

Tabla 1

Estructura de costos asociados con la producción de la biomasa

Operación	Descripción	No. de intervenciones	Tiempo requerido (horas)	Costo (USD \$/ha)	Porcentaje (%)
Propagación de las halófitas	Colocación del suelo en macetas (botellas PET)	1	8	609.83	14.01
	Extracción de las especies halófitas (plantas madre) en campo	1	8	429.63	9.85
	Obtención de esquejes y su colocación en las botellas PET	4	32	2,392.07	54.89
	Manejo agronómico	12	96	926.03	21.25
Costo total				4,357.56	100

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la actividad de la colocación del suelo en las botellas PET, este rubro incluyó: el costo de 20.32 Mg de suelo arcilloso de baja conductividad eléctrica ($\leq 2 \text{ dSm}^{-1}$) (115.18 USD \$/Mg) y el costo de su transportación a la parcela (considerando una distancia recorrida promedio de 20 km) por medio de un camión Torton de Redilas Fijas de la marca Kenworth y modelo T800, con una capacidad de carga de 20.8 Mg (70.74 USD \$/viaje), mismo que incluyó, el pago del operador, los gastos del combustible consumido y la descarga del suelo en la parcela.

Para colocar el suelo en el camión Torton de Redilas Fijas, se consideró la renta de una Retroexcavadora de la marca Case, modelo 580N (32.27 USD \$/hora). También, se consideró el costo de 14,516 botellas PET (Politereftalato de etileno) con un peso de 72 g, un diámetro de 8.7 cm, una altura de 33cm y una capacidad de 2 litros por botella (\$ 247.53 USD \$); así como el costo de la renta de un camión Torton de Redilas Fijas de la marca Kenworth y modelo T800, con una capacidad de carga de 20.8 Mg y 43.75 m³ de espacio en su caja (7 m de largo, 2.5m de ancho y 2.5m de alto) para transportar las botellas PET desde la recicladora hasta la parcela (considerando una distancia recorrida promedio de 20 km) (70.74 USD \$/viaje), mismo que,

incluyó el pago del operador, los gastos del combustible consumido, así como la carga y descarga de las botellas. Esta actividad, también incluyó el costo de la mano de obra de seis jornaleros (73.37 USD \$/día) para cortar por la mitad a cada una de las botellas PET (para satisfacer el requerimiento de 29,031 halófitas por hectárea) y llenar con 700g de suelo arcilloso de baja conductividad eléctrica cada una de ellas.

En cuanto a la extracción de las plantas de *S. verrucosum* (plantas madre) en campo, se consideró el costo de la mano de obra de seis jornaleros (73.37 USD \$/día) para recolectar 2000 halófitas de 76.8 ± 5.32 g de peso fresco y una altura promedio de 25.34 ± 3.18 cm por planta. Esta actividad, también consideró el costo de 2000 bolsas de poliestireno negras (calibre 500), con capacidad de 5 kg (de 14 cm de diámetro y 24 cm de alto cada una) para su recolección (259.21 USD \$), así como la renta de 334 cajas vacías de poliestireno de alta densidad (de 0.51 m de largo, 0.29 m de altura y 0.33 m de ancho) de la marca ENVASES FR, con un peso de 1.8 kg cada una (26.31 USD \$) para colocarlas en los 43.75 m^3 de espacio que tiene la caja del camión Torton de Redilas Fijas y facilitar su traslado a la parcela (70.74 USD \$/viaje). La carga y descarga del material vegetal colectado en el camión se considera parte de la labor que le corresponde a los jornaleros contratados; por tanto, se omitió el pago de este rubro.

Respecto a las actividades relacionadas con la obtención de los esquejes y su colocación en las botellas PET, estas incluyeron: el costo de la mano de obra de seis jornaleros (73.37 USD \$/día) en cuatro días consecutivos para la obtención de 15 ± 2 esquejes por halófitas colectadas; el costo de cuatro botellas de 500 g de ácido indol-3-butírico de la marca RADIX®10,000 intercontinental (72.42 USD \$) para promover el establecimiento y desarrollo de los esquejes (aplicando una dosis de 68 mg por esqueje); el costo de siete toldos-carpa de la marca COLNME, de 9 m de largo, 3 m de ancho y 2.1 m de alto (1,105.23 USD \$) para resguardar los 29, 031 esquejes colocados en las botellas de PET; el costo de dos cisternas Rotomex®, modelo TVN, con capacidad de 5 m^3 cada uno (842.10 USD \$) para la aplicación de los riegos a los esquejes en las botellas PET, a fin de mantenerlos a una capacidad de contenedor del 70% aproximadamente; el costo por la renta de un pozo (2.63 USD \$/día) para extraer agua de buena calidad por un lapso de cinco minutos, dos veces por semana, durante 45 días y la renta de una línea de riego de 3 km de longitud promedio (3.94 USD \$/día), utilizada cinco minutos al día, dos veces por semana, durante 45 días, para llenar las cisternas Rotomex®.

Por su parte, el costo del manejo agronómico de los esquejes en las botellas PET, incluyó el costo de 58.062 kg de urea (46-00-00) para cubrir todo el lote de esquejes (29,031 halófitas por hectárea) (45.59 USD \$); el costo de la mano de obra de seis jornaleros (73.37 USD \$/día) para la realización de los riegos a los esquejes (dos veces por semana, durante 45 días) y para la

aplicación de la urea en las botellas PET en cuatro ocasiones (una vez por semana, partiendo del día 15 hasta el día 43).

La tabla 2, muestra la estructura de los costos operativos asociados con la producción de la biomasa de la especie *S. verrucosum* en campo.

Tabla 2

Estructura de los costos operativos de la especie S. verrucosum en campo, durante un periodo de 240 días.

Operación	Descripción	No. de intervenciones	Tiempo requerido (horas)	Costos (USD \$/ha)	Porcentaje (%)
Preparación del cultivo en campo	Laboreo:				
	▪ Barbecho	1	6	39.47	3.89
	▪ Rastreo	2	12	78.94	7.78
	▪ Surcado	1	6	39.47	3.89
	Trasplante de los esquejes en campo	3	24	220.11	21.68
	Manejo agronómico	32	10.66	637.12	62.76
Costo total				1015.11	100

Fuente: Elaboración propia.

Las actividades de laboreo comprendieron: el costo por la renta de un tractor de la marca John Deere, modelo 3029T para realizar las actividades de barbecho (39.47 USD \$/ha), rastreo (78.94 USD \$/ha) y surcado (39.47 USD \$/ha), mismas que incluyeron el consumo de combustible, el pago del operador de la maquinaria y los accesorios requeridos para llevar a cabo cada una de las labores mencionadas, como es el caso del arado de reja reversible, la rastra de discos y la acamadora.

En cuanto a las actividades relacionadas con el trasplante de los esquejes en la parcela, se consideró el costo de la mano de obra de seis jornaleros (73.37 USD \$/día) durante tres días consecutivos, para trasladar y cultivar los esquejes.

Las actividades relacionadas con el manejo agronómico de las halófitas en la parcela, comprendieron la renta de un pozo (4.19 USD \$/20 min) para extraer agua de buena calidad, una vez por semana, durante un periodo de ocho meses y la renta de una línea de riego con una longitud promedio de 3 km (15.72 USD \$/20 min), utilizada una vez por semana durante ocho meses para la conducción y distribución del agua de riego sobre la parcela.

Por otra parte, al no existir un valor comercial de la especie *S. verrucosum* en la zona, el costo de la biomasa vendible se estableció a partir del valor de la biomasa de otras especies vegetales que brindan los mismos beneficios que el de la especie halófito en cuestión, en este caso, como cultivo forrajero; principalmente porque en el municipio de Villamar: a) no se cuenta con una cultura gastronómica orientada a su consumo y porque, b) la planta es una arvense muy común en la localidad, lo cual podría dificultar su comercialización como planta ornamental.

Por tanto, dado que, entre los principales cultivos forrajeros de la zona, se encuentran la alfalfa (*Medicago sativa* L.) con un valor de biomasa de (35.78 USD \$/Mg) y la avena (*Avena sativa* L.) con un valor de biomasa de (45.38 USD \$/Mg) (SIAP, 2018), se consideró un valor de biomasa para la especie *S. verrucosum* de (40.58 USD \$/Mg); un valor justo, si se toma en cuenta el beneficio que aportaría su continua disponibilidad y el valor nutrimental que tendría para al ganado, principalmente cuando la sequía y las condiciones climáticas de la zona sean adversas.

En lo que atañe a la producción de la biomasa vendible, la especie *S. verrucosum* logra una producción de 15.83 ±0.30 Mg/ha, de acuerdo con la densidad de halófitas proyectadas, las condiciones ambientales y el manejo agronómico establecido para un periodo de 240 días.

$$V = 1 \times \int_0^1 ((4,357.56) + (1015.11)) - [(15.83) \times (40.58)] dt$$

$$V = 4,730.29 \text{ USD } \$$$

Este valor representa el costo promedio de la fitodesalinización por hectárea de una parcela ubicada en el municipio de Villamar-Michoacán, México.

Costo del yeso agrícola (CaSO₄ 2H₂O)

La tabla 3, muestra la estructura de costos relacionados con la aplicación del yeso agrícola en campo.

Tabla 3

Estructura de costos asociados con la aplicación de yeso agrícola (CaSO₄ 2H₂O)

Operación	Descripción de la operación	Número de intervenciones	Tiempo requerido (horas)	Costos (USD \$/ ha)	Porcentaje e (%)
Preparación del suelo para la enmienda	Laboreo:				
	▪ Barbecho	1	6	39.47	0.77
	▪ Rastreo	2	12	78.94	1.54
	Nivelación del terreno	1	5	354.35	6.88

Manejo agronómico	1	18.25	1,090.07	21.18
Costos fijos			3,584.39	69.63
Costo total			5,147.22	100

Fuente: Elaboración propia.

Las actividades de laboreo comprendieron la renta de un tractor de la marca John Deere, modelo 3029T para realizar las operaciones de barbecho (39.47 USD \$/ha) y rastreo (78.94 USD \$/ha), mismas que incluyeron el consumo de combustible, el pago del operador de la maquinaria y los accesorios requeridos para llevar a cabo dicha labor productiva, como es el caso del arado de reja reversible y la rastra de discos.

En cuanto a la nivelación del terreno, para facilitar la aplicación del yeso agrícola, se consideraron los costos por la renta de un tractor de la marca John Deere (39.30 USD \$/ha) y una niveladora láser de la marca FIELDKING, modelo FKLLLEFD-10-L73029T (31.57 USD \$/hora) para obtener una pendiente de 1.5%. El tiempo estimado para la realización de esta operación es de cinco horas.

Las actividades relacionadas con el manejo agronómico comprendieron los costos relacionados con la renta de un pozo (4.19 USD \$/20 min) para extraer agua de buena calidad, a fin de ser utilizada en la parcela durante 18 horas y quince minutos de manera continua y, los costos por la renta de una línea de riego con una longitud promedio de 3 km (15.72 USD \$/20 min) para ser utilizada igualmente durante 18 horas y quince minutos de manera continua, con el propósito de lograr la conducción y distribución del agua de riego sobre el terreno y facilitar la lixiviación del sodio.

Los costos fijos incluyeron el precio de 40.77 Mg de yeso agrícola (3,218.68 USD \$); el costo de transportación de la enmienda química para ser llevada desde la casa comercial hasta la parcela que se pretende remediar; el costo por la renta de un camión Torton de Redilas Fijas de la marca Kenworth y modelo T800, con una capacidad de carga de 20.8 Mg (70.74 USD \$/viaje), tomando en cuenta una distancia recorrida promedio de 20 km. Además, para facilitar su aplicación sobre el terreno, se consideraron los costos por la renta de un tractor (39.30 USD \$/ha) y una Retroexcavadora de la marca Case, modelo 580N (32.27 USD \$/hora) para colocar las 40.77 Mg de enmienda química sobre un tirador de yeso tipo LANCER 7500 (23.58 USD \$/ha); estimando un tiempo para la realización de este proceso de cinco horas.

DISCUSIÓN

El estudio mostró que el costo de la fitodesalinización fue 8.1% menor, que el uso del yeso agrícola para reducir la salinidad del suelo. Hecho que, podría explicarse, por el bajo costo de la

materia prima, mano de obra e insumos agrícolas implementados; los cuales, de manera conjunta, representaron el 63.13% del valor total de la fitodesalinización.

El estudio también mostró que, los mayores costos relacionados con la implementación de la fitodesalinización derivaron principalmente de la infraestructura que fue requerida para propagar las plantas halófitas a través de la técnica de esquejes, como fue el caso de los toldos-carpa (23.36%) y las cisternas (17.80%); las cuales, de manera conjunta, representaron el 41.16% del valor total de la fitodesalinización. Mientras que, en el caso del yeso agrícola, los mayores costos fueron producto de la propia enmienda química (62.53%) y la infraestructura de riego que fue utilizada para facilitar su lixiviación hacia los horizontes inferiores del suelo (21.17%); las cuales, de manera conjunta, representaron el 83.70% del valor total de la práctica.

Los resultados de esta investigación coinciden con los de Trejo-González et al. (2016), quienes señalan que la fitorremediación ha sido bien recibida y ha tenido un aumento significativo en el mercado mexicano, principalmente, porque en comparación con los métodos químicos, pueden llegar a reducir su costo hasta en un 80%.

Al respecto, Qadir et al. (2007), han señalado que el costo elevado del yeso agrícola, provoca que se limite y condicione su acceso, sobre todo, cuando se carece del apoyo gubernamental en materia de subsidios, tal como sucede en gran parte de los países en vías de desarrollo; lo que, a su vez, restringe la capacidad de reacción de los agricultores para afrontar cualquier gasto que pudiera surgir durante el desarrollo de la labor productiva (Shainberg et al., 1989).

Si bien, pudo observarse que la eficacia de ambos métodos (químico y biológico) para reducir los niveles de salinidad en la parcela son equivalentes, es evidente que este último, presenta la capacidad de poder adaptarse a las condiciones socioeconómicas de los productores, principalmente, de aquellos con escasos recursos (Hasanuzzaman et al., 2014), ya que, gran parte de su costo total podría llegar a reducirse hasta en un 32.57%, lo que representa una cantidad de 1,540.77 dólares por hectárea, si la mano de obra es suplida o compensada por el esfuerzo de los propios jornaleros (con el apoyo de sus familias).

Caso contrario a lo que sucede con la aplicación del yeso agrícola, el cual demanda una importante inversión en infraestructura de riego, drenaje, agua de buena calidad para la lixiviación de las sales y sobre todo, grandes cantidades de enmienda química (Quilléro y Thomas, 2012); lo que hace que se vuelvan irremplazables durante su implementación a gran escala (Qadir et al., 2014) y, cuyo costo tiende a incrementarse aún más cuando se presentan niveles elevados de salinidad en el suelo (Murtaza, 2013), tal como se pudo observar en este trabajo.

Sin embargo, el estudio también mostró que el tiempo que se requiere para reducir la salinidad del suelo en la parcela por medio de la fitodesalinización, fue 4.75 veces mayor, en comparación

con la aplicación del yeso agrícola, considerando que esta última necesita en promedio un lapso de 60 días para comenzar a demostrar su viabilidad (de acuerdo con las prácticas agrícolas de los productores de la zona); hecho que coincide con los señalamientos de Dudai et al., (2018), quienes afirman que la fitodesalinización es un proceso de descontaminación lento y en algunas ocasiones puede llegar a prolongarse durante años.

En este contexto, es evidente que la mejor técnica para la recuperación de suelos salinos debe ser aquella que asegure un bajo costo, pruebe ser ambientalmente segura y demuestre una gran efectividad al momento de su implementación a gran escala (Qadir y Oster, 2007).

De ahí que, la fitodesalinización se presente como un método biológico factible por varios aspectos: a) es económicamente viable y técnicamente asequible, b) genera amplios beneficios financieros a partir de la cosecha de las halófitas, c) contribuye al desarrollo de una agricultura ecológica, d) hace buen uso del recurso hídrico, e) incrementa la composición de materia orgánica en el suelo, f) mejora las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo, g) proporciona una mayor disponibilidad de nutrientes en el suelo después de su implementación, h) permite que la remediación del suelo sea más uniforme y, i) promueve el secuestro de grandes cantidades de carbono a lo largo de su desarrollo (Gairola et al., 2015; Devi et al., 2016; Qadir et al., 2007).

Además, de ser un método que permite reducir, reutilizar y reciclar una gran cantidad de residuos sólidos (*i.e* botellas PET) durante la fase de la propagación de la especie halófitas; una medida sencilla, que podría generar un cambio en la cultura de los productores y de los habitantes de la propia localidad en el cuidado del medio ambiente (Mansilla-Pérez y Ruiz-Ruiz, 2009).

CONCLUSIONES

Se confirma que la implementación de la fitodesalinización en el municipio de Villamar Michoacán presenta un menor costo, en comparación con el yeso agrícola, para rehabilitar un suelo de textura arcillosa con problemas severos de salinidad. Por consiguiente, es una práctica agrícola sostenible, orientada a mejorar la producción agrícola y la economía de los productores, a través de su amplia flexibilidad operativa y huella ambiental ligera.

La importancia de implementar este tipo de análisis, deriva de la necesidad de contar con información que sea relevante para determinar la factibilidad de estos métodos en el largo plazo, principalmente, cuando se pretenden implementar a gran escala.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aceves N.E. (2011). El ensalitramiento de los suelos bajo riego. Fundación Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas A.C. México, D. F.
- Allen, S.E. (1989). *Analysis of vegetation and other organic materials*. In: Allen SE, editor. *Chemical analysis of ecological materials*. London: Blackwell Scientific Publications, 46-61.
- Anaya-Flores, R., Cruz-Cárdenas, G., Silva, J. T., Ochoa-Estrada, S., & Álvarez-Bernal, D. (2018). Space-time modeling of the electrical conductivity of soil in a geothermal zone. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(9), 1107-1118.
- Devi, S., Nandwal, A. S., Angrish, R., Arya, S. S., Kumar, N., & Sharma, S. K. (2016). Phytoremediation potential of some halophytic species for soil salinity. *International journal of phytoremediation*, 18(7), 693-696.
- Dudai, N., Tsion, I., Shamir, S. Z., Nitzan, N., Chaimovitsh, D., Shachter, A., & Haim, A. (2018). Agronomic and economic evaluation of Vetiver grass (*Vetiveria zizanioides* L.) as means for phytoremediation of diesel polluted soils in Israel. *Journal of environmental management*, 211, 247-255.
- Gairola, S., Bhatt, A., & El-Keblawy, A. (2015). A perspective on potential use of halophytes for reclamation of salt-affected lands. *Wulfenia*, 22(1), 88-97.
- García, E. (1998). *Climas (clasificación de Köppen, modificado por García)*. Escala 1:1000000. México: UNAM.
- Ghafoor, A., Gill, M. A., Hassan, A., Murtaza, G., & Qadir, M. (2001). Gypsum: an economical amendment for amelioration of saline-sodic waters and soils and for improving crop yields. *Int. J. Agric. Biol*, 3(3), 266-275.
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Alam, M., Bhowmik, P. C., Hossain, M., Rahman, M. M., & Fujita, M. (2014). Potential use of halophytes to remediate saline soils. *BioMed research international*, 2014, 1-13.
- Kim, H. S., Kim, K. R., Lee, S. H., Kunhikrishnan, A., Kim, W. I., & Kim, K. H. (2018). Effect of gypsum on exchangeable sodium percentage and electrical conductivity in the Daeho reclaimed tidal land soil in Korea—a field scale study. *Journal of soils and sediments*, 18(2), 336-341.
- Kocacinar, F., & Sage, R. F. (2003). Photosynthetic pathway alters xylem structure and hydraulic function in herbaceous plants. *Plant, Cell & Environment*, 26(12), 2015-2026

- Lastiri-Hernández, M. A., Alvarez-Bernal, D., Bermúdez-Torres, K., Cárdenas, G. C., & Ceja-Torres, L. F. (2019). Phytodesalination of a moderately saline soil combined with two inorganic amendments. *Bragantia*, 78(4), 579-586.
- Lastiri-Hernández, M. A., Álvarez-Bernal, D., Ochoa-Estrada, S., & Contreras-Ramos, S. M. (2020). Potential of *Bacopa monnieri* (L.) Wettst and *Sesuvium verrucosum* Raf. as an agronomic management alternative to recover the productivity of saline soils. *International Journal of Phytoremediation*, 22(4), 343-352.
- Mansilla-Pérez, L., & Ruiz-Ruiz, M. (2009). Reciclaje de botellas de PET para obtener fibra de poliéster. *Ingeniería industrial*, (027), 123-137.
- Manzano-Banda, J. I., Rivera Ortiz, P., Briones Encinia, F., & Zamora Tovar, C. (2014). Rehabilitación de suelos salino-sódicos: estudio de caso en el distrito de riego 086, Jiménez, Tamaulipas, México. *Terra Latinoamericana*, 32(3), 211-219.
- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 59, 651-681.
- Murtaza, G. (2013). Economic aspects of growing rice and wheat crops on salt-affected soils in the Indus Basin of Pakistan (unpublished data). *Institute of Soil and Environmental Sciences, University of Agriculture, Faisalabad, Pakistan*.
- Nikalje, G. C., Srivastava, A. K., Pandey, G. K., & Suprasanna, P. (2018). Halophytes in biosaline agriculture: Mechanism, utilization, and value addition. *Land Degradation & Development*, 29(4), 1081-1095.
- Nouri, H., Borujeni, S. C., Nirola, R., Hassanli, A., Beecham, S., Alaghmand, S., & Mulcahy, D. (2017). Application of green remediation on soil salinity treatment: a review on halophytoremediation. *Process safety and environmental protection*, 107, 94-107.
- PROCAMPO, (Programa de Apoyos Directos al Campo). 2013. [Accesado el 21/02/2020]. <https://www.agricultura.gob.mx/procampo/listado-de-beneficiarios>
- Qadir, M., Oster, J. D., Schubert, S., Noble, A. D., & Sahrawat, K. L. (2007). Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils. *Advances in agronomy*, 96, 197-247.
- Qadir, M., Quilléro, E., Nangia, V., Murtaza, G., Singh, M., Thomas, R. J., & Noble, A. D. (2014, November). Economics of salt-induced land degradation and restoration. In *Natural resources forum*, 38(4) 282-295.
- Quilléro, E., & Thomas, R. J. (2012). Costs of land degradation and benefits of land restoration: A review of valuation methods and their application. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 7(060), 1-12.

- Rabhi, M., Ferchichi, S., Jouini, J., Hamrouni, M. H., Koyro, H. W., Ranieri, A., & Smaoui, A. (2010). Phytodesalination of a salt-affected soil with the halophyte *Sesuvium portulacastrum* L. to arrange in advance the requirements for the successful growth of a glycophytic crop. *Bioresource technology*, *101*(17), 6822-6828.
- Rasouli, F., Pouya, A. K., & Karimian, N. (2013). Wheat yield and physico-chemical properties of a sodic soil from semi-arid area of Iran as affected by applied gypsum. *Geoderma*, *193*, 246-255.
- Reyes, J.J.; Murillo, B.; Nieto, A., Troyo, E.; Reynaldo, I.M.; Rueda, E. O. & Cuervo, J.L (2014). Crecimiento y desarrollo de variedades de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) en condiciones de salinidad. *Terra latinoamericana*, *32*(1), 35-45.
- Robinson, B., Fernández, J. E., Madejón, P., Marañón, T., Murillo, J. M., Green, S., & Clothier, B. (2003). Phytoextraction: an assessment of biogeochemical and economic viability. *Plant and soil*, *249*(1), 117-125.
- Ruiz, M., & Terenti, O. (2012). Germinación de cuatro pastos bajo condiciones de estrés salino. *Phyton (Buenos Aires)*, *81*(2), 169-176.
- Shainberg, I., Sumner, M. E., Miller, W. P., Farina, M. P. W., Pavan, M. A., & Fey, M. V. (1989). Use of gypsum on soils: A review. *In Advances in soil science*, 1-111. Springer, New York, NY.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2018. [Accesado el 21/02/2020]. http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do
- Silva-García, J. T., Ochoa-Estrada, S., Cristóbal-Acevedo, D., & Estrada-Godoy, F. (2006). Calidad química del agua subterránea de la Ciénega de Chapala como factor de degradación del suelo. *Terra Latinoamericana*, *24*(4), 503-513.
- Taha, A., & Alsayed, H. (2000). Brine shrimp bioassay of ethanol extracts of *Sesuvium verrucosum*, *Salsola baryosma* and *Zygophyllum quatarense* medicinal plants from Bahrain. *Phytotherapy Research: An International Journal Devoted to Pharmacological and Toxicological Evaluation of Natural Product Derivatives*, *14*(1), 48-50.
- Trasviña-Barriga, A., Bórquez-Olguín, R., Leal-Almanza, J., Castro-Espinoza, L., & Gutiérrez-Coronado, M. (2018). Rehabilitación de un suelo salino con yeso agrícola en un cultivo de nogal en el Valle del Yaqui. *Terra Latinoamericana*, *36*(1), 85-90.
- Trejo-González, N., Prieto-Méndez, J., Prieto-García, F., Acevedo-Sandoval, O.A., Marmolejo-Santillán, Y. (2016). Remediation technologies for saline soils: a case study of Mexico. *World*, *3*(1), 060-068.

Welegedara, N. P. Y., Grant, R. F., Quideau, S. A., & Mezbahuddin, S. (2020). Modeling salt redistribution and plant growth in reclaimed saline-sodic overburden upland forests: A case study from the Athabasca Oil Sands Region, Canada. *Forest Ecology and Management*, 472, 118154.