

Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: caso de las zanjas trinchera

Recibido: 28 de agosto de 2014. Aceptado en versión final: 17 de marzo de 2015.

Helena Cotler*

Silke Cram**

Sergio Martínez Trinidad**

Verónica Bunge*

Resumen. Las zanjas trinchera constituyen la principal práctica de conservación de suelos realizada en México y se implementa indistintamente en diversas condiciones geográficas y ecológicas, sin evaluar su impacto.

En este trabajo se evaluaron las zanjas trinchera como práctica de conservación de suelos en 28 sitios distribuidos en siete estados (Baja California Sur, Guanajuato, Hidalgo, Querétaro, Michoacán, Tlaxcala y Veracruz), mediante la caracterización del medio físico, la descripción y análisis de suelos, así como entrevistas a los dueños de la tierra.

Los principales resultados señalan que la construcción de esta obra genera un gran número de impactos negativos. Entre ellos, la remoción de suelos como consecuencia de la excavación, la cual puede movilizar de 60-123 ton/ha y

la exposición de 0.4-6.3 ton/ha de carbono orgánico en la superficie. Los resultados mostraron también que esta práctica no mejora las condiciones de retención de humedad, necesarias para sostener la reforestación asociada y no son adoptadas por la población.

Los resultados y la revisión de literatura permitieron identificar ciertas condiciones ambientales recomendadas para la construcción de zanjas trinchera, como un clima árido y semi-árido (aproximadamente 300 mm de precipitación promedio), rango de pendiente (hasta 40%), suelos poco profundos (menos de 20 cm) y sin horizonte arcilloso y con una vegetación rala y discontinua.

Palabras claves: Erosión, infiltración, materia orgánica, tinas ciegas, política ambiental.

* Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), Av. Periférico Sur 5000, Col. Cuicuilco-Insurgentes, 04530, Coyoacán, México, D. F. E-mail: helena.cotler@inecc.gob.mx, veronica.bunge@inecc.gob.mx

** Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, México, D. F. E-mail: silkecram@igg.unam.mx, sergiomtzt@hotmail.com

Cómo citar:

Cotler, H., S. Cram, S. Martínez T. y V. Bunge (2015), "Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: caso de las zanjas trinchera", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 88, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 6-18, dx.doi.org/10.14350/rig.47378.

Conservation practices assessment in forest soils of Mexico: the case of the ditches

Abstract. Given the intense soil degradation that spans almost half of Mexico, the Mexican government has established various public policies in which soil conservation practices are carried out by the owners in return for a subsidy. The main practices promoted on forest soils by these programs are mechanical, in particular, the construction of ditches.

Nowadays this practice is the main soil conservation practice held in Mexico and carried out in various geographical and ecological conditions; however its impact is not assessed.

The international literature specifies that the goal of this practice is to facilitate the storage of rainwater in arid and semi-arid ecosystems, to reduce the length of water flow, to conserve water and promote the afforestation in degraded environments and to regulate water runoff in urban areas. Unlike the international experience, in Mexico this practice seeks to preserve and restore forest soils. This work aims to assess the ditches from the perspective of a practice that allows the forest soil conservation and to identify environmental and social conditions under which this practice may be appropriate in Mexico.

The evaluation of ditches as a soil conservation practice was performed in 28 sites in seven states (Baja California Sur, Guanajuato, Hidalgo, Querétaro, Michoacán, Tlaxcala and Veracruz), addressing different ecosystems, from arid to humid tropical, expressed in a wide variability of soils and vegetation (scrub, pine, oak forest, grassland and maize).

In each site we characterize the physical environment, with an emphasis on soil analysis, erosion features, infiltration measures as well as interviews with landowners. Measurements were made in sites with and without (control sites)

ditches. Infiltration was measured on the pile of excavated soil where the trees for reforestation are planted.

The main findings indicate that the construction of the ditches result in a large number of negative impacts. Among them, the removal of soils as a result of the excavation of 250 ditches per hectare (recommendation of the policy program), which can mobilize 60-123 ton/ha. Given the depth of the ditch (40 cm), the removal also causes the exposition of 0.4-6.3 ton/ha of soil organic carbon, which is susceptible to mineralization. In terms of hydrologic regulation, this practice does not improve the conditions of moisture retention, which is necessary for a successful reforestation.

Nowadays this practice is not adopted by the landowners. The biggest single benefit received for performing these work, either in private property or common use areas is the economic resource that the program provides. In any case was observed willingness of people to increase the area of trenches, reflecting the weak appropriation around this practice.

The results and the literature review helped to identify certain environmental conditions under which the construction of ditches may be adequate: arid or semi-arid climate (aprox. 300 mm average rainfall), slope range up to 40%, shallow soils (less than 20 cm) without a clay horizon and sparse and discontinuous vegetation. These recommendations were presented and discussed with decision makers and were subsequently introduced into the National Forest Program (PRONAFOR).

Key words: Erosion, infiltration, organic matter, ditch, environmental policy.

INTRODUCCIÓN

Los suelos cumplen con diversas funciones que posibilitan la producción de alimentos, fibras y madera; mantienen la capacidad de retención de agua, regulan los gases de efecto invernadero y alojan una gran biodiversidad, por lo que son esenciales para la sociedad (Blum *et al.*, 2006). Ante el contexto del cambio climático, el mantenimiento de estas funciones a través de prácticas de conservación, es cada vez más relevante, más aún cuando con ello se aumenta el secuestro de carbono y se propicia la adaptación de la sociedad y de los ecosistemas al cambio climático.

Los sistemas de producción agropecuarios y forestales inadecuados son, en muchos casos, la causa de la degradación de los suelos, en especial de la ero-

sión. En esos casos, el establecimiento de prácticas de conservación busca recuperar y mejorar la calidad de los suelos al tiempo que minimiza el proceso de erosión. Sin embargo, la escasa evaluación de la eficiencia de estas prácticas, ha llevado a implementarlas de manera automática, sin supuestos, ni indicadores que permitan su adaptación a distintas condiciones socio-ambientales (Cotler *et al.*, 2013a).

La conservación de suelos no se resuelve solo con una respuesta técnica. En este tema, también la comprensión de los aspectos sociales, culturales y políticos resulta fundamental para entender el proceso de aceptación y de adopción por parte de los dueños de la tierra (De Graaff *et al.*, 2008, 2010; Sattler y Nagel, 2010; WOCAT, 2007).

En México, desde el gobierno federal se han privilegiado las prácticas mecánicas de conservación

de suelos desde hace varias décadas (Trueba *et al.*, 1981). A pesar de ello, el país sigue registrando una intensa degradación de suelos, cuya última evaluación en 2001 muestra un 45% de deterioro a nivel nacional (SEMARNAT-COLPOS, 2002). Como respuesta, en el 2003 se estableció un programa de conservación y restauración de suelos forestales en la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) que mantiene el énfasis en las prácticas mecánicas, como lo aseveran las últimas evaluaciones externas realizadas a este programa (Magaña, 2007; Vargas *et al.*, 2010; Vargas y Vanegas, 2012). En ellas se afirma que la principal práctica realizada por este programa corresponde a las zanjas trinchera (también conocidas como tinas ciegas o zanjas de infiltración), pudiendo abarcar más del 50% del total de las prácticas realizadas.

Las zanjas trinchera son excavaciones que se hacen siguiendo las curvas de nivel. Estas zanjas y otras formas de captura son conocidas desde hace miles de años para propiciar almacenamiento de agua de lluvia en zonas áridas y semi-áridas (Critchley y Siegert, 1991). Varios estudios refieren que esta práctica es utilizada para reducir la longitud del recorrido de agua (Taboada, 2011); captar el agua que escurre y disminuir los procesos erosivos (Pizarro *et al.*, 2004; Anaya *et al.*, 1991); mejorar la eficiencia del uso de agua de la precipitación (Bulcock y Jewitt, 2013); conservar agua y favorecer la producción de biomasa y la aforestación en ambientes degradados (Singh *et al.*, 2013) y regular el agua de escorrentía en zonas urbanas (EPA, 1999; Bhagu *et al.*, 2012).

Las zanjas trinchera se clasifican bajo distintas categorías: como una práctica hidrológica-forestal (Pizarro *et al.*, 2004), una práctica mecánica (Loredo *et al.*, 2005) o bien una técnica de cosecha de agua (*water harvesting*), (Oweis *et al.*, 1998; Madan *et al.*, 2014; Singh *et al.*, 2013; Taboada, 2011). Algunos autores la plantean como una solución para la recarga de mantos acuíferos (Cota *et al.*, 2011), pero hay muy poca evidencia de campo de su efectividad, por la dificultad que representa medir la recarga (Dages *et al.*, 2009); y debido a los impactos negativos identificados a escala de cuenca, se considera un tema que se tiene que abordar de manera cuidadosa (Glendenning *et al.*, 2012).

Las condiciones sugeridas para la construcción de esta obra consideran al clima, el tipo de escorrentía, la pendiente, el tipo de vegetación, la textura del suelo y algunos conceptos hidrológicos (Cuadro 1).

A diferencia de la experiencia internacional donde las zanjas son utilizadas para el control de escurrimientos (Critchley y Siegert, 1991; Pizarro *et al.*, 2008; EPA, 1999; Bhagu *et al.*, 2012), en México esta práctica busca la “conservación y restauración de suelos forestales” (CONAFOR, 2013). La divergencia en el objetivo de esta práctica evidencia la importancia de evaluarlas desde la perspectiva de la conservación de suelos, para que su aplicación no ocasione impactos negativos no planeados.

Este trabajo tiene por objetivos *i*) evaluar las zanjas trinchera desde la perspectiva de una práctica que permite la conservación de suelos forestales, y *ii*) identificar las condiciones ambientales y sociales bajo las cuales esta práctica podría ser adecuada en México.

METODOLOGÍA

La evaluación de las zanjas trinchera (también conocidas como tinas ciegas o zanjas de infiltración) como obra de conservación de suelos se realizó de manera consecutiva a través de tres proyectos (Cotler *et al.*, 2013a, b y c), en los cuales el diseño de muestreo fue el mismo. A través de estos proyectos se evaluó el impacto de las zanjas trinchera en 28 sitios ubicados en los estados de Baja California Sur (BCS), Guanajuato (Gto), Hidalgo (Hgo), Querétaro (Qro), Michoacán (Mich), Tlaxcala (Tlax) y Veracruz (Ver). En el Cuadro 2 se especifican las evaluaciones que se hicieron en cada sitio, ya que en el segundo y tercer proyecto se fueron adicionando variables que se consideraron necesarias para la evaluación.

En cada sitio se caracterizaron las condiciones ambientales: material parental, precipitación anual, pendiente, altitud y orientación, vegetación, rasgos de erosión, profundidad y textura del suelo.

En ausencia de una línea base que permita la comparación de un antes y un después, se utilizaron sitios control (áreas no influenciadas por las zanjas) y sitios con zanjas trinchera. Para cada una de ellas

Cuadro 1. Variables y condiciones sugeridas para la construcción de zanjas trinchera o tinas ciegas

Variable	Criterios	Fuente
Clima	Zonas áridas y semi-áridas, precipitación de 10 a 300 mm	Boers y Ben-Asher (1982), Taboada (2011), Duveskog (2003), INIAF (s/f), Loredo <i>et al.</i> (2005), Oweis <i>et al.</i> (1998), Malik <i>et al.</i> (2014)
	Zonas de clima semi-árido y templado	Anaya <i>et al.</i> (1991), CONAFOR (2009)
Pendiente	Pendiente de 18 a 53%	Bulcock <i>et al.</i> (2013)
	Pendiente de 5-40%	Taboada (2011)
	Pendiente menor de 40%	Anaya <i>et al.</i> (1991, CONAFOR (2009)
Tipo de vegetación	Escasa vegetación natural (pastos, matorrales) y con problemas de erosión hídrica.	Taboada (2011), Duveskog (2003), INIAF (s/f), Oweis <i>et al.</i> (1998)
Características del suelo	Textura de arenosa a franca	Bulcock <i>et al.</i> 2013, Critchley <i>et al.</i> (1991)
Conceptos hidrológicos	Considerar periodo de retorno, curvas intensidad-duración-frecuencia, velocidad de infiltración de los suelos y coeficiente de escorrentía	Pizarro <i>et al.</i> (2004), Loredo <i>et al.</i> (2005), Critchley <i>et al.</i> (1991), Rubio <i>et al.</i> (2009), Anaya <i>et al.</i> (1991)
	En sitios donde la escorrentía es superficial (más que sub-superficial).	Boers y Ben-Asher (1982)

Cuadro 2. Sitios de estudio con las evaluaciones realizadas (sitios evaluados/total de sitios)

Estado	Localidades	Número de sitios	Evaluaciones			
			Estabilidad de agregados	Carbono orgánico (Corg)	Infiltración y humedad a capacidad de campo	Entrevista
BCS	La Paz	1				1/1
Gto.	San Miguel de Allende	6				1/6
Hgo	Vithejé	1		1/1		1/1
Qro.	Banthí	1	5/5	1/1	1/5	1/1
	Jalpan de Serra	5		3/5		5/5
Mich.	Pátzcuaro	11	11/11	11/11	11/11	11/11
Tlax.	San Mateo Actipan	1		1/1		1/1
Ver.	Mecayapan	1	1/1			1/1
	Tatahuicapan de Juárez	1	1/1			1/1

se tomaron el mismo número de muestras. En cada sitio se describieron de dos a tres perfiles de suelo en función de la pendiente (Siebe *et al.*, 1996) y se tomaron muestras por horizontes. En el bordo de la zanja (correspondiente al suelo excavado y colocado en la parte superior) se midió la superficie de suelo cubierta por el material excavado de la zanja. En bordos de las zanjas y en los sitios control se tomaron cinco muestras inalteradas con cilindros de volumen conocido para la determinación de la densidad aparente así como muestras de suelo para el análisis de carbono orgánico y textura. En cada sitio se describieron los rasgos de erosión más importantes siguiendo la metodología dispuesta en Stocking y Murnaghan (2001).

En los sitios de los estados de Michoacán y Querétaro (17 sitios) se hicieron dieciocho mediciones de infiltración en sitios control y en bordos, con un infiltrómetro de doble anillo (marca Turf_Tec International) y se analizó en campo la estabilidad de agregados (Siebe *et al.*, 1996). En muestras de suelos colectadas en estos mismos sitios se realizaron pruebas de retención de humedad a capacidad de campo a través del método de la olla y membrana de presión (Klute, 1986).

Las determinaciones y los métodos utilizados para el análisis de las muestras de suelo en laboratorio fueron:

Densidad Aparente (DA) - Método del cilindro (100 cm³).

Carbono orgánico total (Corg) - Analizador Elemental CHNS/O.

Humedad de suelo *in situ* - Método gravimétrico.

Textura - Hidrómetro (Bouyoucos modificado).

Se utilizaron controles de calidad específicos para cada método (repeticiones, muestra control, calibración de equipos). También se cuantificó la cantidad de suelo removida (ton/ha) y la cantidad de Corg que puede quedar expuesto a la intemperie (ton). Con base en los resultados de DA y Corg obtenidos se realizaron los siguientes cálculos por horizonte:

1. Volumen del horizonte (cm³)= [ancho de zanja: 40 cm] * [espesor del horizonte (cm)] * [largo de zanja: 200 cm].

2. Peso de suelo removido (kg)= [Volumen (1)] * [D.A. (g/cm³) /1000].

3. Corg expuesto (kg)= [Peso (2)] * [Corg (%) /100].

4. Suma de Corg de horizontes: Peso de suelo removido/zanja (kg) y Corg expuesto/zanja (kg).

5. Peso del total del suelo removido por hectárea (ton/ha)= [250 zanjas/ha] * [Peso de suelo removido/zanja (kg)/1000].

6. Corg expuesto por hectárea (ton/ha)= [250 zanjas/ha] * [Corg expuesto/zanja (kg)/1000].

La comparación de infiltración y humedad a capacidad de campo entre sitios control y bordos de las zanjas, se realizó con un análisis de varianza, usando la prueba de t de Student; para conocer la tendencia en los sitios de estudio se realizó una comparación de medias mediante el criterio Tukey ($P \leq 0.05$).

A los datos de cantidad de suelo removido y de Corg que queda expuesto a la intemperie, se les realizó estadística descriptiva, empleando medida de centralización (media) y de dispersión (desviación estándar).

En cada sitio se entrevistó a personas que participaron en la construcción de las zanjas para conocer su percepción sobre las mismas. Las entrevistas se basaron en un cuestionario que abordó tres grandes temas: *a*) la importancia económica de las parcelas donde se implementaron las zanjas y las causas de su degradación; *b*) los requerimientos sociales, técnicos y económicos que necesitan las zanjas, y *c*) las necesidades de mantenimiento y la disponibilidad de replicar esta práctica sin apoyos gubernamentales.

RESULTADOS

Las condiciones ambientales en las cuales se construyeron las zanjas de infiltración fueron muy variables (Cuadro 3), en términos de sustratos litológicos (volcánico, metamórfico y calcáreo), pendientes de 3 a 57% y altitudes de: 600 a 2 649 msnm. La variabilidad climática en la cual se ha realizado esta práctica es muy amplia, desde clima muy seco (Baja

Cuadro 3. Características biofísicas de los sitios estudiados

Ubicación	Material parental	Precipitación anual	Pendiente	Altitud (msnm)/orientación	Vegetación	Rasgos de erosión	Profundidad de suelo	Textura de suelo
Pátzcuaro (Michoacán)	Volcánico	900-970 mm	5-9°	2 630 msnm/SO	Bosque Pino-Encino (con <i>Muhlenbergia</i> spp, <i>Baccharis</i> sp.)	80% de suelo cubierto, erosión difusa. Pedestales en bordos de zanjas.	95 cm	CL-CRA*
	Volcánico		9°	2 233-2 649 msnm/SO	Bosque Pino-Encino (con <i>Baccharis</i> sp, Senecio sp, pastos)	70% de suelos cubierto por vegetación. Compactación (-1 mm).	88 cm	CRA-CL
	Volcánico (riolita)		5-10°	2 228-2 261 msnm/N	Bosque Pino-Encino (con pastos, jaras, agaves)	Suelo desnudo: flujos de escorrentía, terracetos (2 cm); cárcavas.	60-75 cm	CR-R
	Volcánico		8-10°	2 227-2 326 msnm/N	Bosque de pino-encino (con madroño, tejodote, helechos). Mantillo de 4 cm	Erosión difusa muy leve en suelo desnudo.	71-83 cm	C-CL/CRA
San Miguel de Allende (Guanajuato)	Volcánico	500-600 mm	4°	1 990-2 100 msnm/SE	Pastizales naturales	Erosión difusa, formación de pedestales (5 cm), en zanjas: socavamiento de talud, ensanchamiento de ancho de zanjas de 20 cm (en un año).	25 cm	CR-R
	Calcareo		7-10°	1 950-2 070 msnm/S	Materral espinoso (Huizache, nopal, mezquites, estrato herbáceo)	40% suelo desnudo, erosión difusa y compactación (-1 mm); pedestales (1-2 cm). Socavamiento de talud de zanjas.	25 cm	CR-R
	Volcánico		8°	2 030-2 100 msnm/SE	Materral espinoso (nopal, huizache, azibuche, lantrisco, biznagas, mezquites)	10% suelo desnudo, erosión difusa y compactación (-1 mm).	30 cm	CL-R
	Calcareo		5°	1 886 msnm/NO	Materral espinoso (huizache, gatuño, nopal, granjeno, tatalencho)	40% suelo desnudo, erosión difusa; compactación (1-2 mm); terracetos (1-2 cm), cabeceras de cárcavas.	40 cm	CR-RL
La Paz (BC)	Calcareo	260 mm	2°	1 905 msnm/SO	Materral espinoso (huizaches, estrato herbáceo)	20% suelo desnudo; 40% gravas. Pedestales de 10 cm, compactación: 1 mm.	25 cm	CL
	Calcareo		9-15°	1 892 msnm/SE	Materral espinoso (huizache)	80% suelo desnudo, muy pedregoso. Terracetos de 2 cm.	20 cm	C-CRA
	Granito intemperizado		3° (cresta)	615 msnm/S	Materral espinoso (huizache, estrato herbáceo)	40% suelo desnudo con abundantes flujos de escorrentía, surcos y cárcavas.	22 cm	CA-CR

Cuadro 3. Continuación

Ubicación	Material parental	Precipitación anual	Pendiente	Altitud (msnm)/ orientación	Vegetación	Rasgos de erosión	Profundidad de suelo	Textura de suelo
Jalpan de Serra (Queretaro)	Calcareo	860-985 mm	5°	1 140 msnm /S	Matorral espinoso (huizaches)	Erosión difusa.	14 cm	CL
	Calcareo		25°	1 344 msnm/O	Matorral espinoso (huizaches)	Erosión difusa, "camino de vaca", terracetas de 3 cm, 60% pedregosidad.	24 cm	CR
	Calcareo		20°	1 290 msnm/E	Matorral espinoso (huizache, estrato herbáceo) con presencia de musgo localizado en áreas sombreadas	Erosión difusa, "camino de vaca".	18 cm	CR-R
Jalpan de Serra (Queretaro)	Metamórfico	860-985 mm	25°	2 135 msnm/S	Relictos de bosque de encinos con regeneración natural	70% suelo desnudo con erosión difusa.	23 cm	R-RL
	Metamórfico		30°	2 149 msnm /S	Relictos de bosque de encinos con regeneración natural	70% suelo desnudo con erosión difusa.	25 cm	CR-RL
	Metamórfico		17°	2 163 msnm/NO	Bosque de encinos	Suelos bien cubiertos (vaños estratos de vegetación).	>65 cm	R-RL
Vithéjé (Hidalgo)	Volcánico	500-550 mm	8°		Matorral espinoso (arbustos, estrato herbáceo)	Erosión difusa.	>40 cm	CAR
Banhi (Queretaro)	Volcánico		16°		Bosque de pino-encino, con agaves	Erosión difusa.	>45 cm	R
San Mateo Actipan (Tlaxcala)	Volcánico	125 mm	5°	2 580 msnm/NE	Pino con cubierta herbácea	Erosión difusa ligera.		CR
Mpio. Mecayapan y Tarahuitacapan de Juárez (Veracruz)	Volcánico	>3000 mm	11°	600 msnm/104SE	Cultivo de maíz	Terracetas de 2 a 10 cm, pedestales 2-3 cm, retroceso de taludes en un 50%.	45 cm	CR-RL

CL: Franco limoso; CRA: Franco arcillo-arenoso, CR: Franco arcilloso, R: Arcilloso; C: Franco; CL: Franco limoso; CAR: Franco areno-arcilloso; RL: arcillo-limoso.

California) a cálido-húmedo (Veracruz). Las texturas de los suelos varían de francas, franco limosas, franco arcillosas a arcillo limosas y las profundidades del solum de 14 a 95 cm. La vegetación incluye matorral espinoso (47.6% de los casos), bosque de pinos (24%), bosque de encinos (14.3%), pastizales (9.5%) y cultivo de maíz (4.6%).

Los rasgos de erosión superficial presentan intensidades muy variables. En 48% de los sitios, la cobertura vegetal era mayor al 60% donde solo en algunas porciones de suelo desnudo se observó una erosión difusa. En un 28% de los sitios se observaron también pedestales. En un 24% se encontraron rasgos de erosión de mayor intensidad como terracetos, surcos y cárcavas.

El objetivo de la construcción de las zanjas es disímil. En el 47% de los casos el objetivo principal fue buscar el incremento de la infiltración, un 10% esperaba que esta obra ayudase en la supervivencia de la reforestación y 43% esperaba frenar la erosión de suelos.

La construcción de las zanjas requiere la excavación del suelo en sus primeros 40 cm y este material se deposita a un lado de la zanja. Considerando las especificaciones de las zanjas (0.4 m * 0.4 m * 2.0)

y los valores de D.A. (Cuadro 4) se calculó que la cantidad de suelo que se extrae y deposita sobre la superficie del suelo varía entre 60 y 123 ton/ha y los efectos adversos que se identifican por esta acción son los siguientes:

1. La remoción y extracción ocasionan la alteración del suelo como cuerpo natural, impactando diversas características edáficas. El material extraído que forma el bordo tiene una D.A. mayor y una estabilidad de agregados menor que el suelo en los sitios control. Este material expuesto es susceptible de erosionarse ladera abajo.
2. La excavación del suelo superficial expone a la intemperie entre 0.42 a 6.3 ton de Corg/ha, dependiendo de las características de los suelos (% Corg, D.A. y profundidad de los horizontes). La mayor cantidad de suelo y de Corg removido se encuentra en los suelos tipo Luvisol, Phaeozem y Andosol, mientras que los suelos con menor desarrollo clasificados como Leptosol y Regosol presentan los valores más bajos (Cuadro 4).

Cuadro 4. Remoción de suelo y cantidad de carbono orgánico expuesto por la construcción de tinajas ciegas

Sitio	Tipo de suelo (WRB, 2006)	Remoción de suelo (ton/ha)	Exposición de C (ton/ha)	Densidad aparente	
		Media ± Ds	Media ± Ds	Sitio Control	Bordo de zanja
				Media ± Ds	Media ± Ds
Pátzcuaro					
Pichátaro	Andosol úmbrico	64 ± 10.2	3.7 ± 0.6	0.58 ± 0.04	0.58 ± 0.02
Cerritos	Luvisol crómico	117 ± 6.2	1.8 ± 0.7	0.89 ± 0.08	0.96 ± 0.03
Nocutzepo	Andosol mólico	80.5 ± 7.7	2.5 ± 0.6	0.57 ± 0.04	0.63 ± 0.05
Jalpan de Serra (Qro.)					
Buenavista	Regosol calcárico	60.8 ± 0.8	0.97	0.91 ± 0.03	0.98 ± 0.04
La Mohonera	Leptosol calcárico	61.2 ± 1.2	0.5 ± 0.1	1.35 ± 0.5	s.d.
Epazote Grande	Phaeozem háplico	98.3 ± 0.7	6.3	0.90 ± 0.18	0.95 ± 0.07
Banthí (Qro.)	Phaeozem háplico	64 ± 8.2	3.1 ± 0.3	0.69 ± 0.25	0.96 ± 0.08
Vithejé (Hgo.)	Leptosol lítico	91 ± 8.3	1.5 ± 0.5	1.14 ± 0.08	1.24 ± 0.15
San Mateo Actipan (Tlax.)	Phaeozem háplico	70 ± 6.2	1.4 ± 0.3	0.96 ± 0.17	0.99 ± 0.13

3. El talud de las zanjas en sitios con horizontes franco-arcillosos a arcillosos se ha ido socavando y ha retrocedido hasta 20 cm, lo cual incrementa la cantidad de suelo removido.
4. El material excavado sepulta un área de 2 m² por zanja, por lo que en una hectárea los bordos pueden cubrir hasta 5% de la superficie (500 m²) alterando las funciones originales del suelo.
5. La infiltración medida en los sitios de Michoacán y Querétaro presenta velocidades moderadas (5.08 - 15.24 cm/h) y muy rápidas (> 50.8 cm/h), (USDA, 1999) representando condiciones naturales adecuadas de infiltración (Cuadro 5). Los bordos de las zanjas presentaron una capacidad de infiltración mayor que los sitios control, a excepción de uno de los sitios (Nocutzepo), como se observa en el Cuadro 5. En el primer caso, los bordos de las zanjas se componen de material con disturbio, reflejado en la baja estabilidad de agregados que pueden incrementar su erosionabilidad. En el caso de Nocutzepo, la densa cobertura del bosque de pino-encino, con estratos arbustivos y herbáceos dan origen a un mantillo de 2.5 a 8 cm de grosor, que favorece una mayor infiltración en el sitio control.
6. En todos los casos, los bordos presentan una menor retención de humedad a capacidad de campo en comparación con los sitios control

(Cuadro 5), lo cual puede explicarse por la mezcla de partículas con menor contenido de materia orgánica en comparación con el horizonte superficial de suelo control, así como al arreglo de sus agregados, que modifican su espacio poroso; factores asociados a la retención de humedad a capacidad de campo (Bronick y Lal, 2005). Esta propiedad repercute en la cantidad de agua disponible y representa condiciones desfavorables para la supervivencia de la reforestación sobre el material del bordo, que muchas veces va asociada a la construcción de las zanjas.

En las entrevistas se pudo constatar que, en general, los terrenos elegidos para la construcción de las zanjas son poco utilizados por los dueños o por la comunidad. En todos los casos visitados, fueron los técnicos de CONAFOR los que propusieron esta práctica, desconocida muchas veces por los propietarios. Una vez recibido el apoyo, la asamblea elige al grupo de personas que recibirán el jornal otorgado por el programa para la construcción de las zanjas. Una vez que éstas se construyen, muchos predios se cercan, aunque en ocasiones, los propietarios permiten la entrada del ganado para utilizar como bebedero el agua acumulada en las zanjas.

El principal beneficio individual que reciben los que realizan estas obras, ya sea en predio privado

Cuadro 5. Infiltración (cm/hr), humedad a capacidad de campo (%), estabilidad de agregados y textura en el sitio control (área no influenciada por la zanja) y en el bordo de la zanja. Letras diferentes en el sitio control y en el bordo de la zanja de cada propiedad, indican que las medias presentan diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$)

Sitio	Infiltración (cm/hr)		Humedad a capacidad de campo (%)		Estabilidad de agregados		Clase Textural
	Control	Bordo	Control	Bordo	Control	Bordo	
Pichátaro I (Michoacán)	13.6b ±4.5	19.9a ±2.7	38.5*	30.0*	Alta	Alta a Baja	franca
Cerritos (Michoacán)	10.4b ±6.7	40.3a ±19.7	33.4a ±2.2	27.5b ±1.6	Alta	Baja a Muy baja	franco arcillosa
Nocutzepo (Michoacán)	67.4a ±10.6	41.9b ±12.8	59.7a ±2.9	62.6a ±2.4	Alta a Mediana	Mediana a Baja	franca
Buenavista (Querétaro)	67.6a ±56.7	104.8a ±75.3	38.3a ±0.8	32.6b ±1.3	Mediana	Baja	franco arcillo arenosa

o en áreas de uso común, es el recurso económico que el programa les brinda. En ningún caso se pudo observar disposición de la gente a incrementar el área de zanjas o darles mantenimiento con recursos propios, lo que refleja la escasa apropiación en torno a esta práctica.

En general, este tipo de prácticas son realizadas por hombres y mujeres con rango de edad entre 20 y 50 años, en localidades con una alta migración masculina. En terrenos duros, un hombre puede realizar seis zanjas por jornal, mientras que una mujer hace tres. La meta planteada por los trabajadores tiene que ver con el número de zanjas, no con las horas trabajadas. El pago es de \$15 pesos por zanja (CONAFOR, 2013), con lo cual un hombre estaría ganando \$90 pesos por día y una mujer la mitad. El costo del programa por hectárea, considerando solo el pago de jornales y omitiendo el costo de la reforestación, es de \$3 750 pesos. Con ello, esta práctica representa una de las más caras promovidas por la Comisión Nacional Forestal en el país.

Retomando las consideraciones de la literatura revisada (Cuadro 1) y los resultados encontrados en los sitios estudiados, en el Cuadro 6 se perfilan algunas condiciones socio-ambientales propicias para la construcción de zanjas o tinas ciegas. Entre ellas se hace hincapié en la importancia de implementar esta práctica de manera puntual, no generalizada y

solo en ambientes áridos o semi-áridos con suelos superficiales, presencia de rasgos de erosión y vegetación escasa y degradada.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A diferencia de la experiencia internacional, donde las zanjas se utilizan para disminuir escurrimientos y almacenar agua en ciertos ambientes áridos, en México esta práctica busca la “conservación y restauración de suelos” bajo cualquier condición climática (*Ibid.*). Como resultado se han identificado importantes impactos negativos sobre la calidad de los suelos ocasionados por la construcción de las zanjas trinchera.

La excavación de los primeros 40 cm para la construcción de las zanjas remueve grandes cantidades de suelo que quedan expuestos al efecto erosivo de la lluvia. A esta profundidad se puede encontrar el 50% del carbono orgánico edáfico (Balbontín *et al.*, 2009), cuya exposición a la intemperie puede ocasionar su mineralización (Geissen *et al.*, 2013). El incremento del disturbio en el suelo por labranzas –o en este caso, excavaciones– es el factor principal para la mineralización de la materia orgánica (Robert, 2001). El proceso de mineralización libera CO₂ a la atmósfera, convirtiendo al suelo en emisor

Cuadro 6. Condiciones socio-ambientales propicias para la construcción de tinas ciegas como práctica de conservación de suelos

Objetivo y condiciones propicias para la construcción de zanjas trinchera o tinas ciegas	
Objetivos	-Humedecimiento de horizontes sub-superficiales (dependiendo de sus características físicas y químicas). -Almacenar agua, cuando el suelo no esté en condiciones de cumplir con estas funciones.
VARIABLES BIOFÍSICAS	-Clima árido y semi-árido (máximo 400 mm de precipitación promedio). -Ladera (hasta 40% de pendiente) con rasgos de erosión hídrica: pedestales, terracetas, flujos de escorrentía, surcos. -Suelos poco profundos (menos de 20 cm), pueden ser pedregosos, con poca materia orgánica. -Suelos sin horizonte arcilloso o franco-arcilloso en el perfil. -Ladera sin presencia de cárcavas o cabeceras de cárcavas (indicador de socavamiento de taludes). -Vegetación degradada, espaciada y discontinua. -Se debe realizar de manera puntual en la ladera y siempre debe ir acompañada de otras prácticas de conservación, principalmente de tipo vegetativo.
Necesidades sociales	-Presencia de organización (a nivel de ejidos, grupos de trabajo) para formar brigadas de trabajo. -Posibilidad de cercar el predio para impedir la entrada de ganado.

de este gas en lugar de sumidero (Bedard-Haughn *et al.*, 2006; Robert, 2001).

Esta pérdida es aún más desfavorable dado que el carbono orgánico constituye el detonador principal para el mantenimiento de las funciones básicas de los suelos (Janzen, 2006); en ambientes degradados con escasa vegetación por pastoreo o deforestación, la fuente de carbono orgánico es de por sí muy limitada (Balbontín *et al.*, 2009). Bajo esas condiciones, la pérdida de varias toneladas de carbono por hectárea representa una limitante para la recuperación de las funciones de esos suelos. Por ello, toda práctica de conservación de suelos debe buscar recuperar, mantener y/o incrementar el contenido de materia orgánica del suelo (Chabbi y Rumpel, 2009; Jandl *et al.*, 2007; Delgado *et al.*, 2013) acción que no realizan las zanjas trincheras.

En términos de retención de agua, los bordos de las zanjas no presentan condiciones adecuadas para dar humedad a las plantaciones. Este resultado es similar a lo reportado por Pizarro *et al.* (2004:11) quien después de evaluar las zanjas de infiltración durante dos años dentro de parcelas agrícolas, pudo constatar que esta práctica es “más importante en el control del escurrimiento [...] que en brindar humedad a los cultivos”.

Estudios anteriores (Cotler *et al.*, 2013a) muestran que las zanjas trincheras no mejoraron características edáficas importantes para el mantenimiento de la calidad de los suelos, como contenido de carbono orgánico, nitrógeno total, porosidad y densidad aparente. Dada la complejidad de las interacciones suelo-planta, algunas evidencias demuestran que minimizar el disturbio del suelo constituye el mejor medio para conservar su humedad (Hartfield *et al.*, 2001; Delgado *et al.*, 2013).

La conservación de suelos requiere de la apropiación y adopción de las prácticas por parte de los dueños de la tierra (Sattler y Nagel, 2010; De Graaff *et al.*, 2008 y De Graaff *et al.*, 2010). Hoy en día, la participación en la conservación de suelos responde a un interés económico proporcionado por los programas de gobierno. Ante la ausencia de éstos, los dueños de la tierra dejan de realizar y mantener este tipo de prácticas. En los casos estudiados se pudo constatar la reticencia de los ejidatarios a construir zanjas trincheras sin recibir

incentivos económicos. Probablemente el alto costo de esta práctica por hectárea y sus escasos beneficios impiden su apropiación.

Los resultados presentados nos hacen concluir que las zanjas trincheras no mejoran la calidad de los suelos, por ende no lo conservan. Su implementación debe hacerse de manera acotada y puntual en ambientes áridos y semiáridos, con suelos superficiales, erosionados, con muy poca materia orgánica. Utilizarla sin consideración de las características ambientales y sociales conlleva, a una degradación de la calidad de los suelos, que es justamente lo que se quiere revertir.

La implementación generalizada de una práctica de conservación, en condiciones ecológicas disímiles, sugiere que no se tienen claras las condiciones en las cuales esta práctica puede proporcionar algún beneficio, y evidencia la debilidad de este programa de política pública en relación con la especificidad territorial.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo pudo realizarse gracias al apoyo financiero de la Fundación Gonzalo Río Arronte I. A. P. y al Fondo Mexicano de Conservación de la Naturaleza A.C. Los autores agradecemos la asesoría y supervisión de Pilar Fernández Lomelín en los análisis de suelos, a René Alcalá Martínez en el análisis de retención de humedad, a Kumiko Shimada por la determinación de C y N, a Flor Navarrete Cisneros por llevar a cabo los análisis y a Armando Navarrete Segueda por su valiosa ayuda durante el muestreo. Sergio Martínez Trinidad agradece la beca posdoctoral otorgada por la DGAPA-UNAM. Agradecemos los comentarios de los revisores que enriquecieron y mejoraron el artículo.

REFERENCIAS

- Anaya, M., M. Martínez, A. Trueba, B. Figueroa y O. Fernández (1991), *Manual de conservación del suelo y del agua*, 3ª. ed., Colegio de Posgraduados, México.
- Balbontín, C., C. C. Omar, F. Paz and J. Etchevers (2009), “Soil carbon sequestration in different eco-regions in Mexico”, in Lal, R. and R. Follett (eds.),

- Soil carbon sequestration and the greenhouse effects, SSSA Special Publication, no 57, pp. 71-96.
- Bedard-Haughn, A., F. Jongbloed, J. Akkerman, A. Uijl, E. De Jong, T. Yates and D. Pennock (2006), "The effects of erosional and management history on soil organic carbon stores in ephemeral wetlands of hummocky agricultural landscapes", *Geoderma*, no. 135, pp. 296-306.
- Bhagu, R. C., D. Graillot and S. Gaur (2012), "Storm-water management through infiltration trenches", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 138, no. 3, pp. 274-281.
- Blum, H. E. W., P. B. Warkentin and E. Frossard (2006), "Soil, human society and the environment", *Geological Society*, Special publication, no. 266, pp. 1-8.
- Boers, T. M. and J. Ben-Asher (1982), "A review of rainwater harvesting", *Agricultural Water Management*, no. 5, pp. 145-158.
- Bronick, J. C. and R. Lal (2005), "Soil structure and management", *Geoderma*, no. 124, pp. 3-22.
- Bulcock, M. L. and G. P. W. Jewitt (2013), "Key physical characteristics used to assess water harvesting suitability", *Physics and Chemistry of the Earth*, no. 55, pp. 89-100.
- Chabbi, A. and C. Rumpel (2009), "Organic matter dynamics in agro-ecosystems, the knowledge gap", *European Journal of Soil Science*, no. 60, pp. 153-157.
- CONAFOR (2009), "Restauración de ecosistemas forestales. Guía básica para comunicadores", Comisión Nacional Forestal, México [http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/71579Restauraci%C3%B3n%20de%20ecosistemas%20forestales.pdf; 12 de diciembre 2014].
- CONAFOR (2013), *Manual de obras y prácticas de protección, restauración y conservación de suelos forestales*, 4ª. ed., Comisión Nacional Forestal, México.
- Cota, E., L. Marín y M. Balcazar (2011), "Recargas de acuíferos mediante la construcción de tinajas ciegas", *ProNatura*, vol. 3, núm. 17, pp. 12-14.
- Cotler, H., S. Cram, S. Martínez Trinidad and E. Quintamar (2013a), "Forest soil conservation in central Mexico: an interdisciplinary assessment", *Catena*, no. 104, pp. 280-287.
- Cotler, H., S. Cram y V. Bunge (2013b), *Evaluación de prácticas de conservación de suelos en sitios del proyecto Cuencas y Ciudades*, INECC/ Instituto de Geografía, UNAM/Fondo Mexicano de Conservación de la Naturaleza, México.
- Cotler, H., S. Cram, S. Martínez Trinidad y V. Bunge (2013c), *Evaluación de prácticas de conservación de suelos en Pátzcuaro y Sierra Gorda*, INECC/ Instituto de Geografía, UNAM/Fundación Gonzalo Rio Arrente, A. C., México.
- Critchley, W. and K. Siegert (1991), *A manual for the design and construction of water harvesting schemes for plant production*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, AGL/MISC/17/91.
- Dages, C., M. Voltz, A. Bsaibes, L. Prévot, O. Huttel, X. Louchart, F. Garnier and S. Negro (2009), "Estimating the role of a ditch network in groundwater recharge in a Mediterranean catchment using a water balance approach", *Journal of Hydrology*, no. 375, pp. 498-512.
- De Graaff, J., A. Kessler and P. Olsen (2010), "Farm-level adoption of soil and water conservation measures and policy implications in Europe", *Land Use Policy*, no. 27, pp. 1-3.
- De Graaff, J., A. Amsalu, F. Bodnar, A. Kessler, H. Posthumus and A. Tenge (2008), "Factors influencing adoption and continued use of long-term soil and water conservation measures in five developing countries", *Applied Geography*, no. 28, pp. 271-280.
- Delgado, A. J., A. M. Nearing and W. C. Rice (2013), "Conservation practices for climate change adaptation", *Advances in Agronomy*, no.121, pp. 47-115.
- Duveskog, D. (2003), "Soil and water conservation with a focus on water harvesting- A study guide for farmer field schools and Community based Study Groups", FARMESA, Harare, Zimbabwe [http://gardenorganic.org.uk/sites/www.gardenorganic.org.uk/files/resources/international/WaterHarvestingAndConservationBookletA5.pdf; 7 julio].
- EPA (1999), *Storm water technology fact sheet. Infiltration trench*, Environmental Protection Agency, USEPA, 832-F-99-019.
- Geissen, V., S. Wang, K. Oostindie, E. Huerta, K. B. Zwart, C. J. Ritsema and D. Moore (2013), "Effects of topsoil removal as a nature management technique on soil functions", *Catena*, no. 101, pp. 50-55.
- Glendenning, C. J., F. F. van Ogtropb, A. K. Mishrac and R. W. Vervoort (2012), "Balancing watershed and local scale impacts of rain water harvesting in India - A review", *Agricultural Water Management*, no. 107, pp. 1-13.
- Hartfield, J. L., T. J. Sauer and J. H. Prueger (2001), "Managing soils to achieve greater water use efficiency: a review", *Journal of Agronomy*, no. 93, pp. 271-280.
- INIAF (s/f), "Ficha de sistematización de tecnologías. Zanjas de infiltración para el manejo de praderas", Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal [http://www.iniaf.gob.bo/IMAGES/bajarINIAF/3-ZANJAS-DE-INFILTRACION.pdf].
- Jandl, R., M. Lindner, L. Vesterdal, B. Bauwens, R. Baritz, F. Hagedorn, W. D. Johnson, K. Minkinen and A. K. Byrne (2007), "How strongly can forest management influence soil carbon sequestration?", *Geoderma*, no. 137, pp. 253-268.

- Janzen, H. H. (2006), "The soil carbon dilemma: shall we hoard it or use it?", *Soil Biology & Biochemistry*, no. 38, pp. 419-424.
- Klute, A. (1986), "Water retention: laboratory methods", in Klute, A. (ed.), *Methods of soil analysis. Part 1*, Agronomy Monograph 9, ASA and SSSA Madison, WI, USA.
- Loredo, C., S. Beltrán, J. L. Sarreón y C. M. Domínguez (2005), "Prácticas mecánicas para el control de la erosión hídrica", en Loredo, C. (ed.), *Prácticas para la conservación de suelo y agua en zonas áridas y semi-áridas*, INIFAP-CIRNE-Campo Experimental San Luis, Libro técnico núm. 1, México.
- Madan, K. M., V. M. Chowdary, Y. Kulkarni and B. C. Mal (2014), "Rainwater harvesting planning using geospatial techniques and multicriteria decision analysis", *Resources conservation and recycling*, no. 83, pp. 96-111.
- Magaña, O. (2007), "Evaluación externa de los apoyos de reforestación, obras y prácticas de conservación de suelos y sanidad forestal. Ejercicio Fiscal 2006", Universidad Autónoma de Chapingo y Grupo GSP, Estado de México.
- Malik, R. P. S., M. Giordano and V. Sharma (2014), "Examining farm-level perceptions, costs and benefits of small water harvesting structures in Dewar, Madhya Pradesh", *Agricultural Water Management*, no. 131, pp. 204-211.
- Oweis, T., A. Oberle and D. Prinz (1998), "Determination of potential sites and methods for water harvesting in central Syria", in Blume, H., H. Eger, E. Fleischhauer, A. Hebel, C. Reij and G. K. Steiner (eds.), *Towards sustainability land use, Advances in Geoecology*, vol. 1, no. 31, pp. 83-88.
- Pizarro, T. R., V. J. P. Flores, P. C. Sangüesa y A. E. Martínez (2004), *Monografías de zanjas de infiltración*, Universidad de Talca, Bosques de Chile, Terranova, Bosque Villanueva Ltda., Chile.
- Pizarro, T. R., V. J. P. Flores, P. C. Sangüesa, A. E. Martínez y L. León (2008), "Diseño hidrológico de zanjas de infiltración en el secano costero e interior de las regiones semiáridas de Chile", *Bosque*, vol. 29, núm. 2, pp. 136-145.
- Rubio, G. E., R. M. Martínez y B. B. Sánchez (2009), *Tinas ciegas*, SAGARPA-Colegio de Postgraduados, Estado de México.
- Robert, M. (2001), *Soil carbon sequestration for improved land management*, World Soil Resources Reports 96, FAO, Roma [ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/wsr96e.pdf revisado 24 febrero 2004].
- Sattler, C. and J. U. Nagel (2010), "Factors affecting farmers acceptance of conservation measures - a case study from north-eastern Germany", *Land Use Policy*, no. 27, pp. 70-77.
- SEMARNAT-Colpos (2002), *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250,000. Memoria Nacional*, SEMARNAT-Colegio de Postgraduados, México.
- Siebe, C., J. Reinhold y K. Stahr (1996), *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C., Publicación Especial, núm. 4, México.
- Singh, G., D. Mishra, K. Singh and R. Parmar (2013), "Effects of rainwater harvesting on plant growth, soil water dynamics and herbaceous biomass during rehabilitation of degraded hills in Rajasthan, India", *Forest Ecology and Management*, no. 310, pp. 612-622.
- Stocking, M. y N. Murnaghan (2001), *Manual para la evaluación de campo de la degradación de la tierra*, Ediciones Mundi-Prensa, México.
- Taboada, L. (2011), *Evaluación de la erosión hídrica en áreas con zanjas de infiltración*, Ministerio de Agricultura-Agro Rural, Perú.
- Trueba, A., S. Trueba y M. Anaya (1981), *Evaluación de la eficiencia de cuatro prácticas mecánicas para reducir las pérdidas de suelo y nutrientes por erosión hídrica en terrenos agrícolas de temporal*, DGSA-SARH, pp. 89-100.
- USDA (1999), *Soil Quality Test Kit Guide*, United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service and Natural Resources Conservation Service-Soil Quality Institute [http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044790.pdf].
- Vargas, E., M. Vanegas, E. Ojeda, J. Sepúlveda y M. P. Lozano (2010), *Informe de evaluación externa de los apoyos de restauración de suelos forestales, ejercicio fiscal 2009*, Universidad Autónoma de Chapingo, Estado de México.
- Vargas E. y M. Vanegas (2012), *Evaluación complementaria del PROCOREF. Ejercicio Fiscal 2011*, Universidad Autónoma de Chapingo, Estado de México [http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/71579Restauraci%C3%B3n%20de%20ecosistemas%20forestales.pdf: 6 Julio 2014].
- WRB (2006), *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*, IUSS-ISRIC-FAO, World Resources Base, Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.