



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

EFECTO DE LA EROSIÓN HÍDRICA DE SUELOS EN LOS INGRESOS Y LA POBREZA EN LOS PRODUCTORES AGRÍCOLAS DE HIDALGO

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA Y DE LOS
RECURSOS NATURALES**

Presenta:

MONTSERRAT NAHUIOLLIN RUIZ ALONSO

Bajo la supervisión de:

JUAN HERNÁNDEZ ORTÍZ, DOCTOR EN CIENCIAS



APROBADA



Chapingo, Estado de México, Mayo de 2024

EFFECTO DE LA EROSIÓN HÍDRICA DE SUELOS EN LOS INGRESOS Y LA POBREZA EN LOS PRODUCTORES AGRÍCOLAS DE HIDALGO

Tesis realizada por Montserrat Nahuiollin Ruiz Alonso bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

Maestra en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales

Director:



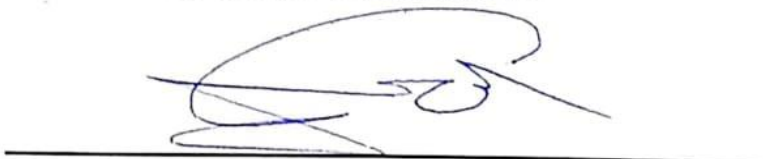
Dr. Juan Hernández Ortiz

Asesor:



Dr. Ramón Valdivia Alcalá

Asesor:



Dr. José Joaquín Flores Félix

Contenido

1.	Introducción general.....	1
1.1	Antecedentes.....	3
1.2	Justificación	6
1.3	Planteamiento del problema	8
1.4	Objetivos.....	11
1.4.1	Objetivo general	11
1.4.2	Objetivos particulares	11
1.5	Hipótesis.....	11
2.	Revisión de literatura.....	12
2.1	Erosión de suelos	12
2.2	Erosión hídrica de suelos	14
2.3	Erosión, pobreza y carencia alimentaria.....	18
2.4	Panorama nacional.....	25
2.5	Panorama en el Estado de Hidalgo	26
2.6	Producción del maíz grano	26
2.7	Situación del maíz grano en México	29
3.	Erosión hídrica de suelos en Hidalgo: Pérdida económica en maíz grano, pobreza y carencia alimentaria	32
3.1	Resumen	32
3.2	Introducción	34
3.3	Materiales y métodos.....	36

3.3.1 Descripción de la zona de estudio.....	36
3.3.2 Cálculo de la erosión de suelos.....	38
3.3.3 Diseño del modelo.....	40
3.3.4 Pérdida económica de la producción.....	43
3.3.5 Relación erosión hídrica de suelos y pobreza	43
3.3.6 Recopilación de la información.....	45
3.4 Resultados y discusión	47
3.4.1 Erosión hídrica calculada	48
3.4.2 Modelo de regresión lineal múltiple para el maíz grano	52
3.4.3 Pérdida económica por erosión de suelos.....	59
3.4.4 Erosión de suelos y pobreza	61
3.5 Conclusiones	62
3.6 Literatura citada	63
4. Conclusiones generales	66
5. Literatura citada	68

Lista de figuras

Figura 1. Gráfica del rendimiento del maíz grano en temporal en Hidalgo entre 2012 y 2022.	9
Figura 2. Ubicación del estado de Hidalgo	37
Figura 3. Municipios que reportan agricultura de temporal y erosión hídrica de suelos en Hidalgo	47
Figura 4. Comportamiento de los rendimientos de maíz grano de acuerdo con la fertilización del suelo y erosión hídrica en una escala municipal.	54
Figura 5. Comportamiento de los rendimientos de maíz de acuerdo con el uso de herbicidas y erosión hídrica en una escala municipal.	55
Figura 6. Comportamiento de los rendimientos de maíz de acuerdo con el acceso a programas agrícolas y erosión hídrica en una escala municipal.	56
Figura 7. Comportamiento de los rendimientos de maíz de acuerdo con el acceso a créditos y erosión hídrica en una escala municipal.	56
Figura 8. Comportamiento de los rendimientos de maíz de acuerdo con la precipitación media anual y erosión hídrica en una escala municipal.	57
Figura 9. Valor de la producción y producción pérdida (\$) por erosión hídrica de suelos de maíz grano en Hidalgo.....	61

Lista de cuadros

Cuadro 1. Grados de mejora tecnológica considerados	41
Cuadro 2. Base de datos utilizada	45
Cuadro 3. Grado de erosión hídrica de suelos de los municipios con agricultura de temporal de Hidalgo	48
Cuadro 4. Factor de Erosividad de la lluvia (R).....	49
Cuadro 5. Factor de Erosividad del suelo (K)	49
Cuadro 6. Factor topográfico longitud-pendiente (LS)	50
Cuadro 7. Valores de erosión por municipio	51
Cuadro 8. Rendimiento del maíz grano y erosión calculada	53
Cuadro 9. Estadístico t de las β del modelo.....	58
Cuadro 10. Pérdida económica por erosión hídrica por hectárea	59
Cuadro 11. Pérdida económica por erosión de suelos por municipio	60
Cuadro 12. Análisis de correlación de Pearson (r) de la erosión de suelos, pobreza y carencia alimentaria.	62

Abreviaturas usadas

INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
CONEVAL	Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
IFAD	Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola
RUSLE	Ecuación Revisada Universal de Pérdida de Suelo
SIAP	Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera
CA	Censo Agropecuario
PIB	Producto Interno Bruto

Dedicatorias

A mi mamá, Ma Guadalupe Alonso, por ser mi guía tanto en la vida como en el camino de la investigación y apoyarme incondicionalmente en cualquier cosa que necesitara, tanto emocional como intelectualmente.

A mi papá, Javier Ruiz, que siempre me ha dado su confianza y sacrificio, por escucharme y darme consejos para afrontar la vida.

A mis hermanas, Jimajanari y Ameyaltzin, por apoyarme en todos los momentos buenos y malos y volverse mi motivación para alcanzar mis metas.

A mi director de tesis, Juan Hernández, por su guía y paciencia para orientarme en todo el proceso.

A toda mi familia porque siempre estuvo pendiente de mí, mostrando todo su apoyo y amor; por estar dispuestos a motivarme a seguir adelante en todo el proyecto.

A mi novio, por su amor y por entender los momentos en los que me ausenté por dedicarme a este proyecto.

A mi amiga, por compartir todo este camino conmigo, por las discusiones y por el apoyo mutuo.

A todas las personas, maestros y compañeros, que formaron parte de este proceso mediante consejos y críticas constructivas para mi crecimiento académico.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por el apoyo y el financiamiento económico durante estos dos años que hicieron posible lograr mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo y en especial a la División de Ciencias Económico – Administrativas por brindarme el espacio y las herramientas para adquirir el conocimiento necesario en el desarrollo de la maestría y mi investigación.

A mi director de tesis el Dr. Juan Hernández Ortiz por su tiempo, conocimiento, orientación y paciencia para desarrollar de la mejor manera posible mi investigación, que sin su apoyo esta investigación no hubiera sido posible.

A la Dr. Ramón Valdivia Alcalá y al Dr. José Joaquín Flores Félix por formar parte de mi comité asesor, gracias a sus aportes intelectuales y orientación logré desarrollar mi investigación.

A todos mis profesores y compañeros de la división de Ciencias Económico – Administrativas que compartieron sus conocimientos dentro de las cátedras que fueron un elemento fundamental para crecer y desarrollarme dentro del entorno académico – intelectual

Datos biográficos

Datos personales

Nombre	Montserrat Nahuiollin Ruiz Alonso.
Fecha de Nacimiento	02 de abril de 1999
Lugar de Nacimiento	Nezahualcóyotl, Estado de México.
CURP	RUAM990402MMCZLN09
Profesión	Ingeniería en Recursos Naturales Renovables
Cédula profesional	13733617

Desarrollo académico

Bachillerato	Período 2014 – 2017 Universidad Autónoma Chapingo
Licenciatura	Período 2017 – 2021 Universidad Autónoma Chapingo

Resumen General

EFFECTO DE LA EROSIÓN HÍDRICA DE SUELOS EN LOS INGRESOS Y LA POBREZA EN LOS PRODUCTORES AGRÍCOLAS DE HIDALGO¹

El aumento de la producción agrícola ha traído consigo severos problemas ambientales, económicos y sociales por las prácticas que degradan al suelo, además, este estrés ambiental es de las principales causas de la pobreza. Los rendimientos agrícolas de Hidalgo han presentado una baja de 2015 a 2022, a pesar de ser uno de los estados con más trabajadores en el sector primario. Con el objetivo de conocer la intensidad en la que la erosión de suelos está relacionada con la pérdida económica del productor, sus niveles de pobreza y carencia alimentaria se realizó el cálculo de la erosión en este estado. Esta información fue procesada mediante un análisis de regresión lineal múltiple para obtener un coeficiente de cambio de rendimientos ante un cambio en la erosión, así mismo, se calculó el valor de pérdida económica y su correlación con la pobreza y carencia alimentaria. El estudio arrojó que, en Hidalgo, los factores que impactan más a la producción son la tecnología, el acceso a programas y el acceso a créditos; los cuáles intervienen en la disminución de los rendimientos por erosión (0.0011 toneladas por hectárea); aun así, con el coeficiente obtenido se obtuvo que se pierden en promedio 490 pesos por hectárea cosechada en el municipio, además esta pérdida no presenta un valor alto de correlación con la carencia alimentaria (0.2), pero si una correlación medianamente significativa con los valores de pobreza (0.42). La erosión hídrica de suelos es una problemática que está ligada a la disminución del ingreso de los productores al reducir la fertilidad y motivar el consumo de otros insumos agrícolas que mejoren su producción; sin embargo, las prácticas utilizadas solo se han enfocado en integrar nutrientes al suelo, lo cual, no disminuye la erosión y sigue teniendo efecto en la reducción de los rendimientos.

Palabras Clave: Erosión hídrica, sector agrícola, ingresos, pobreza.

¹Tesis de Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Montserrat Nahuiollin Ruiz Alonso

Director de Tesis: Dr. Juan Hernández Ortíz

Abstract

EFFECT OF SOIL WATER EROSION ON INCOMES AND POVERTY ON AGRICULTURAL PRODUCERS FROM HIDALGO¹

The increase in agricultural production has brought severe environmental, economic, and social problems due to practices that degrade the soil; furthermore, this environmental stress is one of the main causes of poverty. Hidalgo's agricultural yields have decreased from 2015 to 2022, despite being one of the states with the most workers in the primary sector. With the objective of knowing the intensity in which soil erosion is related to the economic loss of the producer, their levels of poverty and food deficiency, the calculation of erosion in this state was conducted. The information was processed through a multiple linear regression analysis to obtain a coefficient of change in yields because of a change in erosion. Likewise, the value of economic loss and its correlation with poverty and food deficiency were calculated. The study showed that, in Hidalgo, the factors that most impact production are technology, access to programs and access to credit; which intervene in the decrease in yields due to erosion (0.0011 tons per hectare); Even so, the coefficient obtained was used to calculate that an average of 490 pesos are lost per hectare harvested in the municipality. Moreover, this loss does not present a high correlation value with food shortages (0.2), but it does have a moderately significant correlation with the values of poverty (0.42). Soil water erosion is a problem that is linked to the decrease in producers' income by reducing yields and motivating the consumption of other agricultural inputs that improve their production; However, the practices used have only focused on integrating nutrients into the soil, which does not reduce erosion and it continues to influence reducing yields.

Keywords: Water erosion, agricultural sector, income, poverty

¹Master's Thesis in Agricultural and Natural Resource Economics, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Montserrat Nahuíollin Ruiz Alonso

Thesis Advisor: Dr. Juan Hernández Ortíz

1. Introducción general

La erosión hídrica de suelos es un fenómeno natural que se ha visto exacerbado por las actividades humanas, especialmente en el sector agrícola, aunque no es una preocupación global, el tema de erosión hídrica es atendido por la Convención de las Naciones Unidas contra la Desertificación (Gisladdottir, et. al., 2005).

Este problema ambiental se encuentra presente en el Estado de Hidalgo; ha adquirido una relevancia debido a su impacto socioeconómico en las comunidades rurales. Por ello la presente tesis tiene como objetivo analizar cómo se relaciona la erosión hídrica en el ámbito agrícola del estado de Hidalgo con los ingresos y la pobreza de su población.

El sector agrícola de Hidalgo aporta el 4.1% del PIB del estado, no obstante, ocupa al 16.3% de la población y la mayoría basa sus ingresos en su producción (INEGI, 2020). Aun así, el uso intensivo de la tierra, las prácticas agrícolas inadecuadas y los efectos del cambio climático han contribuido al deterioro progresivo de los suelos. La erosión hídrica es un proceso de desgaste y arrastre del suelo por la acción del agua, ha generado una pérdida significativa de la capa fértil, lo que ha repercutido directamente en la productividad de los cultivos y, por ende, en los ingresos de los agricultores.

La erosión hídrica de suelos en el sector agrícola de Hidalgo ha generado modificaciones a nivel ambiental, económico y social. A nivel económico, la disminución de la productividad ha llevado a una reducción de los ingresos de los agricultores, lo que ha dificultado su acceso a recursos básicos y ha incrementado la pobreza en las zonas rurales (Pinstrup-Andersen, et. al., 2001). Además, la necesidad de implementar medidas de conservación y recuperación de suelos ha supuesto una carga financiera adicional para los productores.

En el ámbito social, la erosión hídrica ha contribuido al fenómeno de la migración rural (Cotler, et. al., 2010) y esto ha generado un envejecimiento de la población

rural y una pérdida de capital humano en el sector agrícola. Asimismo, la degradación de los suelos ha afectado la seguridad alimentaria de las familias campesinas, quienes dependen en gran medida de la producción local para su sustento.

Esta tesis contribuye a la comprensión la relación entre un factor de degradación ambiental como es la erosión hídrica en el sector agrícola de Hidalgo con variables socioeconómicas. Es un tema de gran relevancia en el contexto actual de cambio climático y degradación de los recursos naturales; así como en la búsqueda de proyectos que consideren al desarrollo sostenible. Así mismo, los resultados de esta investigación servirán como insumo para la formulación de políticas públicas y estrategias de desarrollo rural que aborden de manera integral los desafíos asociados a la erosión hídrica. Además, la tesis aportará conocimientos valiosos para la comunidad científica y académica interesada en el estudio de la degradación de suelos y sus implicaciones sociales y económicas.

1.1 Antecedentes

La erosión hídrica se define como la remoción laminar o en masa de los materiales del suelo debido a la acción del agua de lluvia, la cual puede deformar el terreno y originar canalillos y cárcavas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2012).

La erosión de suelos en comunidades rurales agrícolas de México, como en Hidalgo, es un tema de gran importancia, ya que la producción agrícola se ha detenido en algunos lugares debido a la baja rentabilidad y productividad generada por la pérdida de nutrientes y la reducción de la capacidad del suelo para retener agua. La erosión del suelo puede afectar negativamente la calidad de vida de los productores y representa una barrera para alcanzar el desarrollo sustentable.

Algunos autores han desarrollado investigaciones sobre la evaluación de la erosión hídrica, un ejemplo de ello es la realizada en la cuenca del humedal de Tecocomulco, en el estado de Hidalgo. En este estudio se utilizó la metodología propuesta por Figueroa (1991) para evaluar el grado de erosión hídrica en la zona. Asimismo, se ha empleado la Ecuación Revisada de la Pérdida de Suelo (RUSLE) para cuantificar la pérdida de suelo por erosión hídrica.

En este sentido, se han observado cambios en el uso del suelo y la cubierta vegetal hacia el uso agrícola y urbano. Estos cambios modifican al ambiente, causando que la degradación se presente de una manera gradual, llegando a afectar al sector agrícola. Por lo tanto; es necesario implementar estrategias de conservación del suelo y agua que permitan mitigar los efectos de la erosión hídrica en el sector agrícola.

Investigaciones previas han identificado una serie de consecuencias negativas derivadas de este fenómeno, tales como la disminución de la cantidad del producto cosechado; así como, su calidad de acuerdo con su composición

nutricional, la pérdida de biodiversidad, la degradación del paisaje y la disminución de los ingresos de los agricultores.

Durante las últimas cuatro décadas, un tercio de las tierras agrícolas del mundo han perdido su productividad debido a la erosión del suelo. En Europa, alrededor de 115 millones de hectáreas están afectadas por la erosión hídrica, siendo el área mediterránea donde el riesgo de degradación del suelo por erosión es más alto (Box et al., 1984).

El aumento de la erosión de suelos es resultado de las actividades humanas, una de las causas es la falta de información sobre su valor económico, hay varios documentos en los que se habla del precio de la tierra en usos económicos no agrícolas, sin embargo, en el uso agrícola los estudios son mínimos o nulos (Valdez Zertuche et al., 2015). En Estados Unidos, se reportó que la pérdida de suelos proveniente de las zonas agrícolas era de aproximadamente 958 millones de toneladas en total del país (Tegtmeier, et. al., 2004). Mientras en España la pérdida de suelos oscila entre 20 y 200 toneladas por hectárea en campos agrícolas (Adhikari, et. al., 2011).

Los modelos de rendimientos agrícolas consideran factores edafológicos y climáticos; así como de macro y micronutrientes; por ejemplo, mediante un modelo de regresión lineal múltiple se midió la variabilidad del rendimiento de granos básicos como el maíz, arroz y trigo a nivel mundial en función de la temperatura y precipitación (Ray, 2015), otro estudio que relaciona el suelo con la productividad agrícola es “¿Cuánto nos cuesta la erosión de suelos?” escrito por Cotler (2011), en el cuál se realizó una revisión de los métodos de valoración económica de la productividad del suelo; así mismo se mencionan los trabajos más relevantes en torno a esta área a nivel nacional e internacional; Cotler (2011) menciona que se pierden entre 34 y 58 dólares por hectárea a nivel nacional debido a la erosión del suelo.

En estudios a nivel internacional muestran que el costo por erosión en Estados Unidos está estimado en 44 billones de dólares al año (Pimentel, y otros, 1995) y en la Unión Europea es de 38 billones de euros al año (Montanarella, 2007).

La degradación ambiental y la pobreza tienen una estrecha relación, algunos datos disponibles indican que el número absoluto de pobres es mayor en las zonas rurales y viven en zonas de bajo potencial agrícola (Shiferaw et al., 2004). Existe una incidencia grande de pobreza en áreas marginales debido a suelos pobres, pocas precipitaciones y condiciones adversas (International Fund for Agricultural Development [IFAD], 2001).

En resumen, la erosión hídrica de suelos en el estado de Hidalgo representa un problema socioeconómico y ambiental de gran relevancia en el sector agrícola. La implementación de estrategias de conservación del suelo y agua, como la construcción de terraplenes y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles, es necesaria para mitigar los efectos de la erosión hídrica en la zona. La evaluación del grado de erosión hídrica y la cuantificación de la pérdida de suelo por erosión hídrica son aspectos clave en el análisis de este fenómeno. Por ello, este estudio busca generar conocimiento científico sobre la problemática de la erosión hídrica en Hidalgo relacionándolo con factores económicos como el ingreso y factores sociales como la pobreza, creando conocimiento que pueda utilizarse para promover un desarrollo agrícola sostenible en la región. Además, es necesario comprender los mecanismos en los cuales los agricultores interactúan con el entorno y los factores asociados a la producción para establecer políticas que conduzcan a una mejora sostenible.

1.2 Justificación

La erosión hídrica afecta directamente a los campesinos al disminuir la productividad de los suelos agrícolas, siendo una amenaza a la seguridad alimentaria y, además, se considera un factor de pobreza y migración de las zonas rurales. Sus principales causas son las actividades agrícolas (38.7%), pecuarias (38.7%) y la deforestación (16.4%) (SEMARNAT, 2016). Esta problemática perjudica principalmente a su causante; es decir, la agricultura convencional conlleva a la erosión del suelo, al mismo tiempo disminuye la cantidad y calidad de la producción agrícola; por ejemplo, de acuerdo con INEGI (2007) el 31% de los suelos agrícolas no fueron sembrados debido a erosión, baja fertilidad o descanso.

A nivel nacional se reporta que el 66% de la superficie nacional está afectada por la erosión hídrica (SEMARNAT, 2002) donde el 6% es erosión fuerte o extrema, 24% moderada, 36% leve y el 34% es suelo estable (Bolaños-González, et al., 2023). Este problema de erosión resulta preocupante por sus implicaciones socioeconómicas como la reducción de los agrosistemas, disminución y pérdidas económicas, abandono de tierras y cultivos; y se traduce como la degradación de sistemas naturales y socio-ecosistemas. En los últimos 10 años se ha observado una disminución en la tasa de crecimiento de la productividad agrícola. El producto interno bruto de las actividades primarias ha presentado una tasa de crecimiento anual tan solo de 1.73% durante el periodo 2006-2019 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020), siendo esta una tasa muy baja a comparación del período anterior, en el cual se alcanzaron tasas de hasta 5.5% anual. En México el sector agrícola juega un papel fundamental para entender el desarrollo económico y social del país.

Hidalgo es el segundo estado más afectado por erosión hídrica en México (SEMARNAT, 2002); asimismo, el 75.6% de su producción es de temporal (INEGI, 2017); presenta porcentajes de pobreza importantes, tan solo el 50.6% de la población se encontraba en pobreza y 8% en pobreza extrema (INEGI,

2016) y aunque ya ha disminuido, los valores que presenta hacia el año 2020 aún son preocupantes.

La pobreza de los agricultores es un factor muy dañino porque los disuade de financiar iniciativas de conservación y mejora del suelo, a su vez provoca la degradación de los recursos y una mayor pobreza, cayendo en un círculo vicioso. De igual modo, en el caso de migración ocho de cada mil habitantes migraban, y 12 de cada mil habitantes emigraba; la mayor parte de los migrantes son personas jóvenes entre 20 a 29 años provenientes de comunidades rurales (INEGI, 2016).

Debido a lo antes mencionado, se observa una relación (e incluso un ciclo) entre el incremento de la erosión de suelos y la pobreza. Su relevancia radica en que las políticas públicas, ya sea en torno a lo ambiental, económico o social, deben considerar los tres aspectos en torno a los objetivos del desarrollo sustentable, por lo tanto, se busca brindar un sustento para la toma de decisiones en torno al sector agrícola de México.

1.3 Planteamiento del problema

La erosión de suelos provoca suelos más pobres que limitan la producción agrícola, al mismo tiempo, afecta el capital de los hogares restringiendo la inversión en el campo; por lo tanto, la mejora del suelo está limitado al precio de los insumos, la disponibilidad y acceso al crédito.

Los principales cultivos anuales de Hidalgo son el maíz grano blanco con una producción de 520 391 toneladas en 2022, contando con la mayor superficie sembrada de 194 603 ha, después sigue la producción de avena forrajera, maíz forrajero, cebada grano, entre otros, mientras que en los cultivos perennes se encuentra la producción de alfalfa, pasto y naranja en los primeros lugares (INEGI, 2022).

Hidalgo aporta el 1.6 % al Producto Interno Bruto Nacional, por parte del sector agrícola cuenta con 179 unidades económicas; y a pesar, de no ser relevante con su PIB estatal, el 7.05% de la población se dedica a actividades agrícolas, siendo el área con más trabajadores en el sector primario (INEGI, 2022). En este Estado la población trabajadora del sector primario son mayoritariamente hombres, en 2022 eran responsables del 81.8% de las unidades de producción agropecuaria.

De la población que labora en el sector primario, la mayor parte son familiares que trabajan sin sueldo o salario (236 368), en segundo lugar, están los productores que trabajan en su unidad productiva (154 264) y solo el 3.21% tiene un sueldo o salario (INEGI, 2022). Así mismo, la población que labora el campo tiene de 45 a 65 años (47.6%); sin embargo, es algo preocupante porque el 31.1% de los productores son mayores de 65 años (INEGI, 2022). El hecho de que los productores y sus familias solo cuenten como ingreso el valor de su producción crea una preocupación, y de acuerdo con el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) el rendimiento del maíz grano no ha presentado una gran variación; empero, tiene una tendencia negativa a través del tiempo (Figura 1). En relación del rendimiento podemos suponer que el ingreso de los productores ha disminuido entre 2012 y 2022.

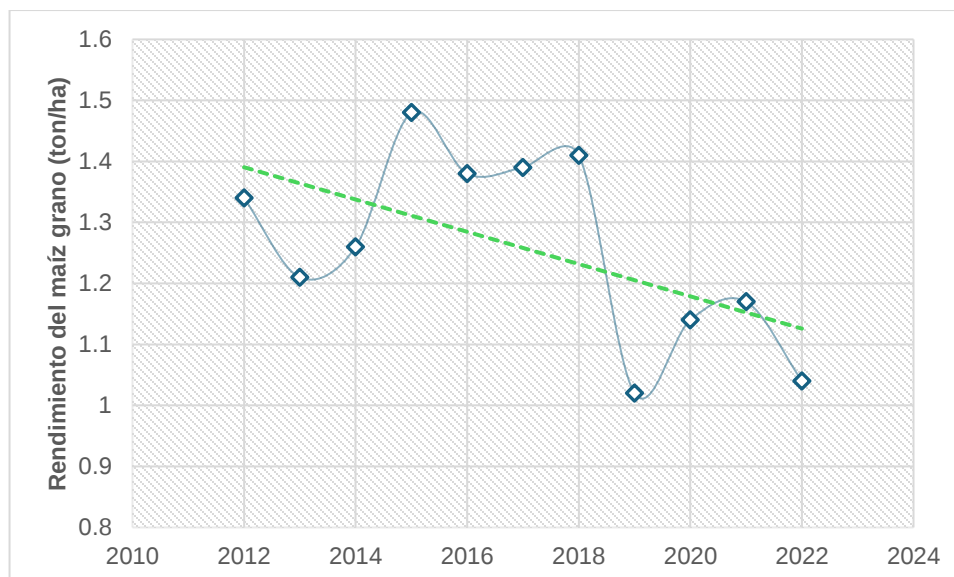


Figura 1. Rendimiento del maíz grano en temporal en Hidalgo entre 2012 y 2022.

Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera.

Por otro lado, la producción ha ido disminuyendo no solo por el rendimiento si no por la superficie que se le brinda a este cultivo; por lo tanto, aquellos agricultores quienes basan su alimentación o ingreso en este consumo presentaran carencias sociales, de seguridad social, de vivienda, alimentaria, entre otras.

Se considera a una persona en situación de pobreza cuando tiene al menos una carencia social de los seis indicadores considerados, además, si tiene el ingreso suficiente para satisfacer sus necesidades básicas (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social [CONEVAL], 2022). Dentro de las carencias sociales que considera el CONEVAL en Hidalgo el 18.3% tienen carencia por acceso a los servicios de salud, 68.7% carencia por acceso a la seguridad social, 9.6% carencia por calidad y espacios en la vivienda, 24.3% carencia por acceso a los servicios básicos en la vivienda y 21.4 carencia alimentaria (CONEVAL, 2020).

Sin embargo, la situación de pobreza, de acuerdo con los últimos datos registrados por el CONEVAL (2020) el 7.24% de la población se encuentra en

pobreza extrema y el 38.4 en pobreza moderada; a pesar de este panorama, entre 2010 y 2020 se ha observado una disminución en los niveles de pobreza de ambos rubros.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Determinar el impacto de la erosión hídrica de suelos en el ingreso, la pobreza y carencia alimentaria, mediante un modelo de rendimiento de la producción agrícola de maíz grano; en el Estado de Hidalgo.

1.4.2 Objetivos particulares

1. Medir el efecto que tiene la erosión hídrica de suelos en la producción de maíz grano en temporal en el Estado de Hidalgo mediante un modelo de regresión lineal múltiple.
2. Estimar el impacto que tiene la erosión hídrica de suelos, en la pobreza y carencia alimentaria.

1.5 Hipótesis

- Existe una relación inversa entre la erosión hídrica de suelos y el rendimiento de la agricultura de temporal, a mayor erosión menor rendimiento en la producción.
- La erosión de suelos juega un papel importante en los niveles de pobreza en las comunidades rurales por su impacto en el ingreso de los productores.

2. Revisión de literatura

2.1 Erosión de suelos

El suelo es la capa más superficial de la corteza terrestre, también conocido como el sustrato que sustenta la vida en el planeta. Por ello, el punto de vista de este estudio se toma en cuenta el concepto de Ortíz-Silla (2015):

Un suelo es un cuerpo natural tridimensional formado por la progresiva alteración física y química de un material original o roca madre a lo largo del tiempo, bajo unas condiciones climáticas y topográficas determinadas y sometido a la actividad de organismos vivos (p. 51).

Además, el suelo se percibe como un elemento natural dinámico que participa como la interrelación entre la atmósfera, la litosfera, la biosfera y la hidrosfera, tomando un papel esencial en el intercambio de materia y energía, por consecuencia, es relevante en los ciclos biogeoquímicos. A pesar de ello, es un recurso natural no renovable, porque su velocidad de formación y regeneración es más lenta que su degradación y deterioro (Ortíz-Silla, 2015).

Según Simonson (1968) el suelo puede ser estudiado desde diferentes puntos de vista: el agronómico, el geológico, el ingenieril y el edafológico (pp. 1-57). El enfoque del presente estudio es el agronómico, es el más antiguo debido a que se desarrolla con el nacimiento de la agricultura; en el cual el suelo se define como un medio poroso, incluso inerte, donde circulan soluciones, aire y las plantas presentan su soporte físico; así como, el medio de nutrición de las plantas (Ortíz-Silla, 2015). Asimismo, el suelo se considera un límite planetario para la expansión agrícola al ser un recurso limitado (Steffen et al., 2015); por lo que se define como un recurso no renovable.

La pérdida de suelo presenta un problema global al no ser renovable; su degradación, se define como “un cambio en el estado del suelo el cual resulta en una disminución inicial para proveer bienes y servicios” (Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires [UNICEN], 2016). De acuerdo con

SEMARNAT (2016), la degradación se puede clasificar de la siguiente manera y se presenta en México con los siguientes porcentajes:

- Química 17.8%
- Física 5.7%
- Erosión hídrica 11.9%
- Erosión eólica 9.5%

Se observa que, entre los dos tipos de erosión relevante, la erosión hídrica es más problemática que la eólica, al menos para el caso de México.

La erosión de suelos tiene como causa principal la actividad agrícola; tiene efectos *on-site* como la pérdida de la fertilidad de los suelos y *off-site* (Montanarella, 2007), también conocidos como externalidades. De acuerdo con Clark et al. (1985) entre los efectos destacan:

1. Sedimentación de ríos, y otros cuerpos de agua
2. Contaminación de aguas por nutrientes y agroquímicos
3. Disminución de la productividad de otros suelos
4. Afectación a la infraestructura rural y urbana

La problemática que se aborda en el presente estudio es la productividad de los suelos, al enfocarse en la actividad agrícola. La erosión de suelos consiste en una pérdida de suelo por arranque, transporte y posterior deposición del material que los constituye, por la acción del agua y del viento (López, et. al., 1988). Además, es considerada una gran amenaza para la agricultura, la producción de alimentos y protección del medio ambiente (Mosavi, et. al., 2020).

La erosión es un proceso que da pie a la pérdida de la capa superficial del suelo, la reducción de la profundidad y la eliminación de nutrientes (Adhikari, et. al., 2011).

Este deterioro se vincula con los procesos de desertificación, el cambio climático (Gisladdottir, et. al., 2005) y la pérdida de la biodiversidad, volviéndose una seria amenaza a la seguridad alimentaria (Li, 2016). La preocupación por este evento ya era mencionada por muchos autores, por ejemplo, Randall (1985) indicaba que las prácticas modernas de producción agrícola aceleraban la erosión del suelo; así mismo, argumentó sobre la creciente contaminación por desechos animales, fertilizantes y plaguicidas.

2.2 Erosión hídrica de suelos

Por su parte, la erosión hídrica es la remoción laminar o en masa de los materiales del suelo debido a la acción del agua de lluvia, deformando el terreno, provocando canalillos y cárcavas (SEMARNAT, 2012).

La erosión hídrica se evalúa por la velocidad en que los sedimentos son removidos de los declives y no por carga de esto en un curso de agua o río, por lo que los factores considerados para su evaluación son (SEMARNAT, 2002):

- Climáticos: Se considera la agresividad o erosividad de la lluvia en función de la cantidad o intensidad de esta.
- Edáficos: Se limita al valor de erosionabilidad del suelo, el cual se puede calcular mediante un nomograma ideado por Wischmeier et al., en 1971, el cual considera los valores de la textura, el porcentaje de materia orgánica, y la permeabilidad del suelo.
- Topográficos: Contempla la longitud, forma y pendiente del terreno.
- Humanos: Se evalúan los efectos de la actividad antrópica en la cubierta vegetal y el suelo, por lo que se considera el tipo de vegetación, porcentaje de la cubierta, y las prácticas de conservación.

El análisis de erosión de suelos debe considerar condiciones que aceleren el proceso como la precipitación pluvial, el tipo de suelo y la cubierta vegetal (Alvarado, et. al., 2007).

Una de las manifestaciones más relevantes de la erosión hídrica son las cárcavas, las condiciones favorables para su formación son un alto índice de erosividad, suelos aluviales, tobas, brechas volcánicas, ferralsoles, nitosoles y acrisoles, drenaje denso y dendríco o subparalelo, y principalmente, la deforestación y la actividad agrícola (SEMARNAT, 2002).

La remoción del suelo trae consigo la pérdida de la primera capa del suelo que contiene la materia orgánica, esta juega un papel importante tanto en la fertilidad como la estructura del suelo (Montanarella, 2007).

La erosión de suelos ha sido un problema ambiental y agrícola, de acuerdo con la historia del proceso agrícola, se ha intensificado los últimos años (Pimentel, et. al., 1995). Sin embargo, hay pocos estudios con implicaciones económicas que permitan reconocer este problema y apoyen la implementación de medidas de conservación (Martínez-Casasnovas, et. al., 2006). Además, se considera que la agricultura es la principal causa de la erosión de suelos y el deterioro de las cuencias hidrográficas (Enters, 1998).

Esto es relevante porque en la década de 1970 se observó que con el propósito de alcanzar la autosuficiencia alimentaria, se adoptó la tecnología de la Revolución Verde, intensificando la erosión de suelos (Jayanath, et. al., 2003). Esto debido al cambio de uso de suelo, la conversión hacia la agricultura depende de qué tan buena es la productividad de la tierra que se esté cultivando (Barbier, 1997).

Para 1986, la superficie total erosionada se estimaba entre el 81% al 98%, esto a causa del uso desmedido de este recurso y aplicación de políticas públicas equivocadas (Alvarado, et. al., 2007).

Las prácticas agrícolas provocan la erosión del suelo a través de la labranza, el cultivo y la tierra desnuda después de la cosecha (Tegtmeier, et. al., 2004). La remoción del suelo también causa daño ambiental al disminuir la composición de la biodiversidad del suelo (Pimentel, et. al., 1995). Aun así, al realizar estudios, se observa como las tecnologías agronómicas favorecen los rendimientos de los productores (Knowler, 2004) subestimando el papel de la erosión de suelos.

El valor económico de un objeto o servicio puede medirse con el vínculo entre esa función y algún servicio (Freeman, 1983), por lo tanto, entre los métodos de valoración de la erosión hídrica está el costo por erosión, este puede estimarse por el costo de remplazo de la pérdida de los nutrientes (Martínez-Casasnovas, et. al., 2006); otro método, es la estimación de la pérdida de productividad (Cotler, et. al., 2010); por último, se encuentra el análisis de costo beneficio, en dónde se consideran las prácticas de conservación de suelos (Adhikari, et. al., 2011). A pesar de estos estudios, es menester monitorear el efecto de la erosión de suelos en los rendimientos a través del tiempo (Bakker, et. al., 2004).

La estimación de los costos se clasifican en el tipo de producción (cultivo) y en función de la superficie (Tegtmeier, et. al., 2004). La tasa de pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en Estados Unidos, en 1995, era de 17 toneladas por hectáres y estimaba que 462 kilogramos de nutrientes se perdían con esta disminución de la capa del suelo (Pimentel, et. al., 1995).

Calcular el efecto de la erosión del suelo en el rendimiento agrícola puede ser complicado debido a las mejoras tecnológicas, las cuales pueden dificultar el análisis (Martínez-Casasnovas, et. al., 2006). Entre las investigaciones que demuestran más este impacto se encuentra el realizado por el Banco Mundial (1996) en África, dónde aún con las mejoras tecnológicas no ha habido un aumento deseado en los rendimientos, porque solo se limitan a la nutrición del suelo (Cohen, et. al., 2006).

Como se observó, la erosión de suelos provoca suelos más pobres que limitan la producción agrícola y por ende el capital de los hogares; cuando los hogares no

cuentan con capital suficiente la inversión en el campo escasea. De acuerdo con Barret, et. al. (2015) la aplicación de nutrientes en el suelo está limitado al precio de los fertilizantes, la disponibilidad y acceso al crédito.

El sector agrícola en México no ha crecido a la misma tasa que otros sectores, por lo que los ingresos no aumentan como en otras actividades económicas. La búsqueda por mejorar los rendimientos motiva la compra de insumos como los fertilizantes (Ávila, 2001).

La deficiencia de micronutrientes en el suelo no solo afecta a la cantidad de producción, sino también a la calidad, esto implica una deficiencia de minerales en los productos, y el consumo de estos provocará que la dieta afecte en la salud de los consumidores (autoconsumo por una parte de los productores), limitando la productividad y los ingresos (Barret, et.al., 2015).

En último lugar, los suelos brindan resiliencia a los pequeños agricultores ante factores estresantes y crisis, un suelo con buenas condiciones es menos vulnerable a heladas y sequías (Barret, et. al., 2015).

Conforme a lo visto, algunos autores como Barret, et. al. (2015), sugieren la utilización de seguros contra riesgos, subsidios para fertilizantes, seguros, créditos y un mayor acceso a la información para poder romper el ciclo suelo-pobreza; esto debería motivar a la creación de programas que controlen efectivamente la erosión (Pimentel, et. al., 1995). Ante lo expuesto se observa un círculo vicioso dónde la actividad agrícola provoca erosión hídrica, lo que disminuye la producción agrícola y no permite la inversión para detener o disminuir la degradación de los suelos, provocando más erosión hídrica.

2.3 Erosión, pobreza y carencia alimentaria

Una de las principales causas de la erosión del suelo es la remoción de la cubierta vegetal. En México, la expansión de la agricultura se ha basado en transformar los ecosistemas naturales en campos de cultivo (Cotler, 2007).

Ante el escenario actual del crecimiento de la población, se pronostica que la demanda de granos básicos será tan grande que; a pesar de los esfuerzos por mejorar los rendimientos de los cultivos, la demanda no será abastecida debido a que la tasa de crecimiento de la población es más grande que la tasa de crecimiento de la producción (Pinstrup-Andersen et al., 2001).

El sector rural está constituido por el 23% de la población mexicana (INEGI, 2022), esta población se dedica a actividades agrícolas principalmente en la producción de granos, semillas, frutas y hortalizas (Ortega-Marín, 2023). En Hidalgo, el 52.8% de la superficie rural se destina a la producción agrícola, estos son 1.04 millones de hectáreas de 2.08 millones de hectáreas con las que cuenta el estado como superficie total (INEGI, 2022).

De acuerdo con CONEVAL (2020) Hidalgo contaba con al menos 1570.6 miles de personas en pobreza, de las cuales 1318.6 miles de personas se encontraban en pobreza moderada y 252 miles de personas en pobreza extrema. La pobreza en las comunidades rurales obliga a que sus ingresos se destinen a su supervivencia, cubriendo las necesidades básicas, evitando la inversión en el cuidado del ambiente.

La pobreza y la hambruna tienen una relación muy importante, siendo la primera, causa de la segunda, pero es una problemática difícil de tratar ya que sus soluciones son las mismas que sus causas, de igual forma las características de esta problemática dependen del lugar de estudio (Wilson, 1994). De acuerdo con Aziz, citado por Wilson (1994) “los gobiernos deberían de llevar a cabo una encuesta sistemática para determinar las causas de la pobreza en un lugar en particular y decidir luego sobre cómo mejor atacar estas causas”.

La pobreza trae a su vez la falta de seguridad alimentaria, de acuerdo con Pinstrup-Andersen et al. (2001), una sexta parte de la población del mundo en desarrollo no tiene acceso a suficiente comida para llevar una vida saludable y productiva, esto trae consigo problemas de salud siendo los principales: anemia por deficiencia de hierro, desórdenes por deficiencia de yodo y deficiencia por vitamina A; la falta de otros micronutrientes trae consigo menor capacidad mental, menos rendimiento en el trabajo y por lo tanto, menor crecimiento económico.

La mayoría de los pobres viven en zonas rurales, y de esta misma gente depende la agricultura; por lo tanto, a ellos deberían ir dirigidos las políticas públicas, buscando asegurar su ingreso y seguridad alimentaria (Pinstrup-Andersen et al, 2001).

La seguridad alimentaria es compleja debido a que es multidimensional y para asegurarse debe haber propuestas en torno a los aspectos sociales, económicos, políticos y ambientales; ello, requiere la participación de todos los sectores (Urquía, 2014).

El camino a la seguridad alimentaria es complicado ya que no solo se debe considerar el factor ambiental; los factores socioeconómicos son importantes ya que la disminución de los salarios, el aumento de desigualdades; así como, la situación política reducen la calidad del medio ambiente y en un rango de tiempo, los costos económicos y sociales que esto conlleva se vuelven muy altos (Ortega-Marín, et.al., 2023).

Uno de los Objetivos del Desarrollo Sostenible es el de la producción suficiente y nutritiva de alimentos, esto se puede lograr con un sistema agroalimentario resiliente, que pueda brindar alimentos suficientes, apropiados y accesibles ante cualquier perturbación o imprevisto (Bullock, et. al., 2017).

El término seguridad alimentaria se dio en la Cumbre Mundial sobre la alimentación, la cuál se celebró en Roma en noviembre de 1996 en la cuál se le definió como:

Existe seguridad alimentaria cuando todas las personas tienen en todo momento acceso físico y económico a suficientes alimentos inocuos y nutritivos para satisfacer sus necesidades alimenticias y sus preferencias en cuanto alimentos a fin de llevar una vida activa y sana (Cumbre Mundial, 1996).

Habría que agregar que la seguridad alimentaria también debe atender la necesidad de lograr una distribución y accesibilidad adecuada a los alimentos, mediante la mejora de las estructuras agrícolas y políticas económicas para fortalecer la soberanía alimentaria (Torres, et. al., 2020).

Entre 1993 y 2017 los granos básicos como el maíz, frijol y trigo presentaron crecimientos negativos, lo que alerta y pone a México en una situación vulnerable; si se observa la balanza comercial, esta ha sido favorable ya que las exportaciones han aumentado, pero a causa de productos como la cerveza y el tequila, mientras, los productos que son parte de la canasta básica se encuentran en las importaciones, esto se traduce en una dependencia del comercio exterior y riesgo de pérdida de seguridad alimentaria (Torres, et. al., 2020).

En México, 41.6% de los hogares presentaron una falta de seguridad alimentaria leve, pero el 28.2% se encuentra en moderada y severa, lo que significa es estas familias redujeron la cantidad de consumo de alimentos; además, esto notifica que solo el 30% de la población se encuentra en un estado de seguridad alimentaria y más de la mitad de la población en este estado se encuentra en zonas urbanas (Mundo-Rosas, et. al., 2013).

La seguridad alimentaria se encuentra en riesgo debido a la falta de dinero u otros recursos; al consumir alimentos más baratos aumentan su consumo de grasas y disminuyen el consumo de fibra; esto trae consigo problemas de salud

como sobrepeso, obesidad o enfermedades crónico degenerativas. Además esto se encuentra relacionado con problemas de depresión y ansiedad en las familias, así como problemas de comportamiento en los niños (Mundo-Rosas, et. al., 2013). Como consecuencia hay un mayor gasto público hacia el sistema de salud.

Hay una relación estrecha entre la intensidad de la seguridad alimentaria y los niveles de pobreza a través de ingresos o gastos en el hogar (Mundo-Rosas, et. al., 2013). La subalimentación se puede calcular como una función de varios indicadores: disponibilidad neta de alimentos para consumo humano, la población del país, estimación de los desperdicios postproducción, necesidad de energía alimentaría y las funciones de distribución normal de consumo de alimentos (Urquía, 2014).

Algunas causas de la crisis en la seguridad alimentaria son problemas de mercado, por lo que se sugiere crear una gobernanza para proteger intereses comunes (Urquía, 2014).

La carencia alimentaria y el ingreso presentan una correlación estrecha, la población que no tiene recursos suficientes para acceder a alimentos en cantidad y calidad suficiente experimentan hambre (Urquía, 2014). De igual manera la carencia alimentaria y la pobreza general están intimamente relacionados ya que ambos se presentan principalmente en unidades económicas rurales.

Para aumentar la producción agrícola de los pequeños productores se requiere de la disminución de los valores de pobreza, incrementando los salarios y brindando empleo a la población, de esta forma se podrá invertir en la conservación de los recursos y de la agrobiodiversidad (Urquía, 2014).

Del mismo modo el gasto público debe orientarse en atender no solo las necesidades inmediatas, si no en generar condiciones que mejoren a largo plazo los ingresos y empleo de los productores (Urquía Fernández, 2014).

Las propuestas metodológicas para evaluar la seguridad alimentaria se enfocan en diferentes cosas; sin embargo, solo consideran algunos puntos, por ejemplo, el acceso a la canasta básica que se limita solo a la parte del ingreso y afecta a todos por igual (Torres, 2020). La FAO también sugirió una metodología basada en la disponibilidad, accesibilidad y estabilidad alimentaria; empero no considera el desperdicio y la calidad de los alimentos.

Otra propuesta es la elaboración de un Índice de Seguridad Alimentaria Municipal y Regional mediante un análisis de componentes principales, lo que permite analizar diversas variables para obtener mapas de vulnerabilidad (Torres, 2020).

La seguridad alimentaria se podrá mantener mediante el crecimiento sostenido de una economía interna donde se ataque a los problemas de distribución del ingreso, recuperación del poder adquisitivo y la generación de empleos; así como la creación de cadenas productivas vinculadas a la producción (Torres, 2020).

El aumento de la producción agrícola ha traído consigo severos problemas ambientales, Wilson (1994) menciona “Una de las principales causas del estrés ambiental en los países en desarrollo es la pobreza y una de las principales causas de la pobreza es el estrés ambiental”. Por lo tanto, la “degradación ambiental se da cuando los pobres pierden la capacidad de sostenerse a sí mismos, de manera sostenible, con su base de recursos naturales” (Pinstrup-Andersen, 2001, p.)

Una de las prácticas de los productores en años previos fue dar un tiempo de descanso al suelo para recuperarlo, pero ante las presiones de demanda esto no es favorable, por lo que la degradación de suelos se ha aumentado rápidamente y algunas zonas incluso han llegado a la desertificación (Wilson, 1994).

Por lo tanto, se puede observar que la pobreza y la degradación ambiental se relacionan directamente, mayor pobreza se traduce en mayor degradación ambiental. En el sector agrícola el control de esta relación puede realizarse mediante diferentes métodos como volver más productivas las áreas ya

cultivadas en más productivas mediante la tecnología, haciendo más eficiente el manejo de los fertilizantes, pesticidas y la irrigación (Wilson, 1994).

Además, la situación jurídica afecta los núcleos agrarios, existen tierras con propiedad social y quienes lo usan no pagan por el daño o no lo conservan adecuadamente; es decir, en este tipo de propiedad los agricultores no tienen la disposición de realizar prácticas de conservación de suelos, ni de establecer un manejo sustentable de tierras a largo plazo (Cotler, 2007).

Para aminorar esta problemática, diferentes investigadores sugieren que se debe atacar desde la política, se deben establecer incentivos para que los agricultores cuiden su tierra o mejoren su acceso al conocimiento y a los insumos requeridos para su cuidado. Se sugiere que la inversión se realice hacia el área de la investigación y el desarrollo tecnológico para el mejoramiento de la tierra (Sara, et. al., 1999).

Wilson (1994) brinda algunas opciones de atacar la pobreza y la falta de seguridad alimentaria, mediante la creación de empleos, inversión en investigación y tecnología, mercados libres de restricciones, subsidios a los productores, brindar créditos, y la promoción del uso sostenible de los recursos, el cuál es el aspecto principal de esta investigación desde el aspecto del recurso suelo. De igual manera existen aspectos sociales a tratar, como la salud, el analfabetismo y la discriminación racial o étnica.

Debido a las presiones del crecimiento acelerado de la población y recursos limitados, la pobreza se vincula al ambiente. Esto se observa en la relación de población y recursos, a mayor población la demanda de los recursos se hace más grande; esta presión en el sector agrícola se observa al obligar a los productores a producir en tierras marginales y permitir menos períodos de descanso del suelo, disminuyendo la productividad de los siguientes años (Wilson, 1994).

Los métodos ineficaces contribuyen en gran medida a la pobreza y la degradación del medio ambiente, y con frecuencia se continúan debido a la falta de recursos y oportunidades para utilizar la tierra de manera adecuada. Desafortunadamente, la política nacional implementada prioriza el apoyo a los fertilizantes, las semillas mejoradas y el desarrollo ganadero, lo cual, muchas veces no satisface las necesidades de las áreas asignadas (Sara et al., 1999).

La erosión del suelo afecta no solo a las zonas rurales, sino también degrada los centros industriales urbanos. Los agricultores se enfrentan al problema de la degradación de la tierra y deciden mudarse a otra ciudad, lo que acelera aún más el crecimiento de los centros industriales. Debido a que estos centros industriales no pueden sustentar a toda esta población, los agricultores se quedan sin trabajo y se enfrentan a problemas de acceso a la salud, inseguridad y otros factores que conllevan a la pobreza (Rojas, 2009).

Para los estudios con implicaciones de la pobreza de cualquier sitio es importante consultar a la comunidad, ya que, de acuerdo con Zopf (citado por Wilson, 1994), “La gente necesita tener más control sobre sus propios recursos y sobre el proceso de desarrollo, sea agricultura, salud o planificación familiar”.

No existen estudios que muestren la relación directa entre el deterioro del suelo y la pobreza; sin embargo, el deterioro afecta negativamente el principal factor de producción y la mano de obra (Cotler, 2007).

Como se ha visto, la relación entre la erosión y la pobreza es un círculo vicioso, Cotler (2015), realiza un compendio de información de fuentes oficiales (INEGI, CONEVAL, SEMARNAT) a nivel nacional sobre la relación entre la erosión de los suelos agrícolas de temporal, con destino de autoconsumo y la carencia alimentaria en México. En su estudio se puede observar una relación positiva moderada entre ambas variables ($r=0.65$). Aunque los resultados no implican una relación causal, si muestran claramente la conexión que existe entre la erosión de suelos agrícolas de temporal y la carencia alimentaria de la población a nivel agregado en el país, según datos de la SEMARNAT (2012).

2.4 Panorama nacional

La erosión hídrica es la más perjudicial para los suelos agrícolas y las principales causas de estas son las mismas actividades agrícolas (38.7%), pecuarias (38.7%) y la deforestación (16.4%) (SEMARNAT, 2016). INEGI (2015) reportó que el 66% de la superficie nacional está afectada por erosión hídrica, donde el 6% es erosión fuerte o extrema, 24% moderada, 36% leve y el 34% es suelo estable (Bolaños et al., 2016).

El problema se visibilizó aún más en México porque en 2007 el 31% de los suelos no fueron sembrados por erosión, baja fertilidad y/o descanso (INEGI, 2007); impactando directamente a la seguridad alimentaria del país.

Como ya se mencionó, la producción agrícola constituye la principal fuente de ingresos de los pequeños productores, por lo tanto, el agua, el suelo y los insumos son los principales recursos con los que debe contar el productor. No obstante, la degradación presentada actualmente ocasiona deterioros en sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Lal, 2008) que afectan la cantidad y la calidad de la producción.

En México, en 2023, el 13% de la población se ocupaba en actividades agrícolas, con un salario promedio mensual de \$2960, con una edad promedio de 48 años y siendo el 82% trabajadores informales, contando con 6.24 años de escolaridad promedio (Data México, 2023).

La mayor parte de las personas pobres que faltan de una seguridad alimentaria se concentran en zonas rurales donde sus ingresos dependen de su producción agrícola (Shiferaw, et, al., 2004). No obstante, una producción que disminuye debido a la degradación requiere más insumos y por lo tanto, más inversión económica, la cual, el productor no puede mantener.

La erosión del suelo afecta directamente al rendimiento, 5 cm de suelo puede disminuir hasta el 15% del rendimiento, y, de acuerdo con otros autores, la erosión ligera puede disminuir hasta 0.47 ton/ha y en zonas con erosión fuerte

puede llegar a afectar hasta a 2.6 ton/ha. De acuerdo, al rendimiento promedio nacional la cuál es de 3.2 ton/ha, la erosión hídrica podría disminuir la producción hasta a 0.6 ton/ha (Cotler, et. al., 2020).

En los últimos años, las prácticas gubernamentales no se han enfocado a las causas de esta problemática, por consiguiente, el problema sigue extendiéndose a nivel nacional (Cotler, et. al., 2020).

2.5 Panorama en el Estado de Hidalgo

Hidalgo es el segundo estado más afectado por erosión hídrica debido a causas agrícolas (SEMARNAT, 2018), además, la superficie agrícola sembrada en el año 2017 fue de 576 907 has, siendo 75.6% de temporal.

De acuerdo con lo reportado por SIAP (2016) la producción mayoritaria era de coliflor, ejote, alfalfa verde, maguey pulquero y cebada en grano; para 2022 la producción principal de cultivos anuales fue de maíz grano, avena forrajera, cebada grano y maíz grano amarillo (INEGI, 2022). Esto podría estar relacionado con el programa “Producción para el Bienestar” establecido en 2020, el cuál apoya a la producción de granos básicos (maíz, frijol, trigo panificable, arroz, amaranto, y/o sistema milpa, entre otros) (SADER, 2023).

Se observa un impacto por el programa establecido, evidenciando un cambio en los cultivos y, por lo tanto, un impacto diferente en la superficie de producción.

2.6 Producción del maíz grano

El clima es uno de los principales factores en la variabilidad del rendimiento, mundial de los cultivos; en el caso del maíz, al menos el 70% de las zonas cosechadoras (incluido México) se ven afectados por el clima, y se ha observado que en más del 60% de las zonas de producción agrícola se ven afectados por las variaciones climáticas, principalmente por las combinaciones de temperatura y precipitación (Ray, et. al. 2015). Para México, el 47% de la variabilidad de los rendimientos está causada por el clima, siendo la variable más importante la

precipitación, mientras, la temperatura es importante solo para las zonas que utilizan riego (Ray, et. al. 2015).

El crecimiento del maíz se beneficia de temperaturas medias entre 21.2 y 24°C, con un rango diurno ideal de 25 a 30°C y nocturno de 15 a 18°C, para lograr una germinación óptima, la temperatura durante el día no debe ser inferior a 10 °C. Estas temperaturas varían según la etapa de desarrollo de la planta, ya que en la fase de madurez se requieren temperaturas óptimas ligeramente superiores (Benacchio, 1982). La iniciación floral del maíz se torna en 17 días o menos con temperaturas cálidas, es decir, mayores a 23° C, mientras que a temperaturas menores a 15° suelen tardar 40 días (Warrington, et. al., 1983).

La disponibilidad de agua es crucial para el cultivo de maíz en regiones tropicales y subtropicales (Gordón-Mendoza, 2020). La falta de agua durante las etapas iniciales, especialmente en los primeros 15 a 30 días, puede causar la pérdida de plantas jóvenes y reducir la densidad de población, lo que puede afectar su rendimiento (Bänziger, et, al., 2012). Sin embargo, existe la posibilidad de recuperar el cultivo sin afectar significativamente el rendimiento, especialmente cerca del período de floración. El maíz es extremadamente sensible a la sequía durante la floración, lo que puede tener un impacto severo en el rendimiento del maíz grano (Bänziger, et, al., 2012).

Las temperaturas relativamente altas promueven un crecimiento más rápido de las hojas, lo cual es beneficioso para la fotosíntesis y el crecimiento de la planta. Por lo tanto, se asocian temperaturas medias con mayores rendimientos finales del cultivo de maíz (Noriega, et. al., 2011).

El maíz requiere entre 500 y 700 mm de precipitación a lo largo de todo su ciclo, distribuida adecuadamente durante su desarrollo. La fase crítica en términos de requerimientos hídricos es desde la floración hasta el llenado de los granos, ya que esta etapa es fundamental para determinar el rendimiento final del cultivo (Bänziger, et, al., 2012).

El suelo ideal para que el maíz grano pueda ser cultivado es aquel que tiene una textura intermedia; es decir, de franco a franco-limoso. A una profundidad de al menos 60 cm y con una buena estructura el maíz suele estar bien drenado y aireado para crecer favorablemente (Luna, et. al., 2003).

El rango óptimo de pH para este suelo es de 5 a 8 (López, et. al., 2019). Valores por debajo de 5 pueden ocasionar problemas de toxicidad debido a la presencia de aluminio, manganeso y hierro, mientras que en suelos con pH elevado se pueden presentar deficiencias nutricionales de fósforo, zinc y hierro (FAO, 2024).

La práctica de monocultivo por un período prolongado reduce el rendimiento debido a la pérdida de suelo, al mantener el mismo porcentaje de cobertura vegetal (Jastrzebska, et. al., 2019). Los períodos de descanso y la rotación de cultivos en las parcelas destinadas del maíz ayudan a evitar las plagas y enfermedades (Jastrzebska, et. al., 2019) y pueden afectar la cobertura vegetal, la cuál afecta los niveles de erosión de suelos.

Existen diversos métodos para preparar el terreno, estos dependen de las condiciones de topografía y tipo de suelo; puede ser labranza convencional, labranza mínima y labranza cero (Górdon, et. al. 2012), cada uno de ellos afectan la aptitud del suelo a ser erosionado.

Los rendimientos agrícolas pueden ser influenciados por la adopción de nuevas tecnologías; sin embargo, esta adopción está sujeta a los ingresos (Shiferaw, et. al., 2004). La degradación del suelo aumenta el riesgo de disminuir la producción en cantidad y calidad; por lo tanto, se esperaría que los productores invirtieran en prácticas que aminoraran la degradación, a pesar de esto, la aplicación de tecnologías de conservación de suelos depende de la estabilidad económica del productor (Shiferaw, et. al., 2004).

La mejora del suelo puede ser inducida por políticas públicas, el acceso al crédito, condiciones biofísicas adecuadas y el aumento del límite de las restricciones de

capital, esto debido a que aumentaría la disponibilidad de adoptar nuevas tecnologías (Shiferaw, et. al., 2004).

Los agricultores invierten en tecnología considerando las problemáticas que presenten, entre las primeras están las plagas y enfermedades, estrés por sequía y disponibilidad de nutrientes en el suelo (Shiferaw, et. al., 2004). Por lo tanto, la degradación que no es una problemática principal para los agricultores queda en segundo plano.

Los métodos de conservación del suelo y el agua requieren una gran inversión de mano de obra, por lo que, los agricultores prefieren utilizar recursos disponibles, utilizando métodos vegetativos. No obstante, la erosión hídrica requiere más atención (Shiferaw, et. al., 2004).

Las políticas públicas suelen enfocarse en subsidiar fertilizantes y agua de riego, pero esto solo aumenta la ausencia de prácticas alternativas de conservación de suelos, y en el momento en el que el productor no puede sustentar esta tecnología vuelve a las viejas practicas (Shiferaw, et. al., 2004).

2.7 Situación del maíz grano en México

El rendimiento promedio de maíz grano en el estado de Hidalgo se encuentra alrededor de las 5.4 toneladas por hectáreas, pero el promedio en agricultura de temporal es de 1.28 toneladas por hectárea (INEGI, 2022). En comparación, el rendimiento de este cultivo varía en otros estados de México (Montesillo, et. al., 2020):

- En Jalisco, el rendimiento es de aproximadamente 5.26 toneladas por hectárea.
- En el Estado de México, el rendimiento es de alrededor de 4.02 toneladas por hectárea.
- En Michoacán, el rendimiento se sitúa en torno a las 4.62 toneladas por hectárea.

- En Puebla, el rendimiento promedio es de aproximadamente 3.80 toneladas por hectárea.

Estos datos indican que el rendimiento de maíz grano en Hidalgo se ubica en un rango similar al de estados como Jalisco y Michoacán. Además, el rendimiento en Hidalgo es ligeramente superior al de estados como México y Puebla (SIAP, 2022).

A partir de 2018, Hidalgo ha mantenido una posición destacada a nivel nacional en la producción de maíz, logrando ubicarse en el noveno lugar en 2021, según información proporcionada por la Secretaría de Desarrollo Agrícola (SEDAGROH, 2018) y la Secretaría de Agricultura y Ganadería (SADER, 2021).

La entidad ha sido reconocida como uno de los principales productores de maíz en México, generando más de 37 mil toneladas anuales de este vital producto agrícola que forma parte de la canasta básica. Esta producción representa aproximadamente el uno por ciento del total nacional de maíz (INEGI, 2022).

En el Estado de Hidalgo, las variedades de maíz grano más comúnmente empleadas en la agricultura son principalmente criollas, con una amplia gama de colores como blanco, amarillo, morado y rojo. Estas variedades se caracterizan por tener mazorcas cilíndricas, granos dentados y puntas desprovistas de grano, correspondiendo a la raza conocida como “Tepecintle”. Adicionalmente, algunas familias también cultivan la raza Olotillo, la cual se distingue por sus mazorcas alargadas y olotes delgados y flexibles (Hernández, 2014).

Los esfuerzos de recuperación y caracterización de variedades criollas de maíz en Hidalgo han evidenciado la presencia y conservación de una diversidad genética local significativa en este estado (CONABIO, 2020).

Cabe destacar que aproximadamente el 95% de las 200 mil hectáreas destinadas al cultivo de maíz bajo condiciones de temporal en Hidalgo corresponden a la siembra de maíces criollos (Pérez, et. al., 2009).

En resumen, las variedades criollas locales, adaptadas a las condiciones específicas de la región, son las más ampliamente utilizadas en la producción de maíz grano en Hidalgo, destacando las razas Tepecintle y Olotillo (CONABIO, 2020), que representan un valioso patrimonio genético y cultural para la entidad.

3. Erosión hídrica de suelos en Hidalgo: Pérdida económica en maíz grano, pobreza y carencia alimentaria

3.1 Resumen

La erosión hídrica afecta al sector agrícola al estar relacionada con la productividad de los suelos, promoviendo la pobreza y amenazando la seguridad alimentaria. Hidalgo es el segundo estado más afectado por erosión hídrica y el 50.6% de su población se encuentra en algún grado de pobreza. En el presente estudio se calculó la relación inversa entre la erosión hídrica y el rendimiento de la agricultura, así mismo, la correlación con la pobreza y la carencia alimentaria de la población. Para la evaluación se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (López, 1998) y se obtuvo un coeficiente relacionado con los rendimientos de maíz grano mediante un modelo de regresión lineal múltiple; se evaluó económicamente la pérdida de productividad y un análisis de correlación para vincularlo a la pobreza y carencia alimentaria. Los resultados arrojan que en Hidalgo por cada tonelada por hectárea de suelo erosionada se pierden 0.0011 toneladas por hectárea de los rendimientos; esto en valores monetarios se puede traducir en una cantidad de 25 pesos por hectárea hasta 1663 pesos por hectárea. Mientras que en los factores socioeconómicos se observó una correlación más alta en los valores de pobreza ($r=0.42$) que con carencia alimentaria ($r=0.2$).

Palabras clave: Erosión; rendimiento; seguridad alimentaria.

¹Tesis de Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Montserrat Nahuiollin Ruiz Alonso

Director de Tesis: Dr. Juan Hernández Ortíz

3. Water Erosion of Soils in Hidalgo: Economic Loss in Maize Grain, Poverty, and Food Insecurity

Abstract

Water erosion affects the agricultural sector by impacting soil productivity, promoting poverty, and threatening food security. Hidalgo is the second most affected state by water erosion, with 50.6% of its population experiencing some degree of poverty. In the present study, the inverse relationship between water erosion and agricultural yield was calculated, along with the correlation with poverty and food insecurity among the population. The Universal Soil Loss Equation was used for the evaluation, and a coefficient related to maize grain yields was obtained through a multiple linear regression model. The economic impact of productivity loss was assessed, along with a correlation analysis to link it to poverty and food insecurity. The results indicate that in Hidalgo, for each ton per hectare of eroded soil, 0.0011 tons per hectare of yields are lost. This can be translated into monetary values ranging from 25 pesos per hectare to 1663 pesos per hectare. Socioeconomic factors showed a higher correlation with poverty values ($r=0.42$) than with food insecurity ($r=0.2$).

Keywords: Erosion; yields; food security.

¹Master's Thesis in Agricultural and Natural Resource Economics, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Montserrat Nahuiollin Ruiz Alonso

Thesis Advisor: Dr. Juan Hernández Ortiz

3.2 Introducción

La degradación de los recursos naturales proveniente de la erosión de suelos es un problema ambiental que impacta a los ámbitos económico, político y social.

El suelo es un recurso natural dinámico formado por materiales orgánicos y minerales, es considerado uno de los recursos más valiosos de una nación (Alvarado, et. al., 2007); provee diferentes funciones ambientales como el sustento de alimentos, almacenamiento de nutrientes, reservorio de materia orgánica y ser el hábitat de diversos microorganismos (Silva, et. al., 2010).

La erosión de suelos influye en los problemas económicos, políticos, sociales y ambientales (Jayanath, 2003) a nivel global y está directamente relacionada con los procesos de desertificación (Gisladdottir, et. al., 2005). El uso del suelo a través de prácticas agrícolas insostenibles producen el agotamiento de la pérdida del capital natural suelo (Knowler, 2004); esto se transforma en un problema porque es un recurso no renovable (Cohen, et. al., 2006).

En México, el 45% del territorio nacional presenta algún grado de erosión, principalmente hídrica, y esto afecta al 77% de las actividades agrícolas (Cotler, et. al. 2010). De igual forma este proceso aumentará si no se toman medidas (Montanarella, 2007). En México y Centroamérica se calcula que en los últimos 45 años se han erosionado casi 61 millones de hectáreas (Alvarado, et. al., 2007).

En la agricultura el suelo es observado como un insumo esencial de la producción de cultivos (Enters, 1998), por lo que se requiere entender los procesos para aplicar medidas que disminuyan la vulnerabilidad de la agricultura a la erosión (Bakker, et. al., 2004). La relación de la erosión con la agricultura puede observarse mediante estudios que muestran la relación entre la profundidad del suelo y los rendimientos (Bakker, et. al., 2004), aunque las variaciones no sean solo por erosión hídrica.

Una de las situaciones que más preocupa a los investigadores es la pérdida de suelos por erosión, ya que de acuerdo con algunos autores puede estar

relacionado con la pérdida de la productividad de los suelos a largo plazo (Pimentel, et. al., 1995), reducción de la capacidad de retener agua del suelo (Montanarella, 2007), disminución de la materia orgánica (Tegtmeier, et. al., 2004), reducción de las primeras capas del suelo limitando la disponibilidad de macro y micronutrientes para los cultivos (Martínez-Casasnovas, et. al., 2006, disminuyendo los rendimientos (Lal, 2008). El costo de la erosión es pagado por la disminución de la productividad agrícola (Pimentel, et. al., 1995).

El cultivo del maíz es de los cultivos más susceptibles a la erosión hídrica (Francisco, et. al., 2006), estudios indican que el rendimiento del maíz en función de la erosión decrece de 3.4 hasta 70 kg/ha al año, dependiendo del tipo de suelo (Pérez-Nieto, et. al., 1998).

El problema de medir la pérdida por erosión es que cada método brinda diferentes resultados del efecto de la erosión en los rendimientos (Bakker, et. al., 2004). A pesar de ello, el impacto en los rendimientos agrícolas puede ser subestimado cuando se aplican tecnologías en la producción (Knowler, 2004).

La mayor parte de los estudios realizados que relacionan la agricultura con la erosión han sido a nivel parcela, mientras que niveles más grandes como cuencas y regiones son mínimos (Cotler, et. al., 2010).

La evaluación económica de la pérdida de suelos es difícil ya que el proceso de la erosión es temporal, es decir, afecta la producción futura; por lo tanto, los efectos no son inmediatos; tiene consecuencias *in-situ* y *off-situ* que son complicadas de identificar y evaluar (Cotler, et. al., 2007). Así mismo, la mejora tecnológica como lo son los fertilizantes pueden ocultar el impacto de la erosión (Martínez-Casasnovas, et. al., 2006) de igual manera, la integración de materia orgánica y otras tecnologías que mejoren la nutrición del suelo tienen un efecto más pronunciado en el incremento del rendimiento que el de pérdida por erosión; por lo tanto, las zonas de estudio dónde se apliquen estas técnicas podrían ocultar los efectos negativos de la erosión (Knowler, 2004).

La erosión de suelos no es solo un problema agrícola, está asociado con situaciones sociales (Enters, 1998) y económicas como la seguridad alimentaria y el desarrollo sustentable (Santos, et. al., 2011). Más del 70% de la población rural depende directamente de la tierra (Adhikari, et. al., 2011); por lo tanto, la pérdida de los rendimientos en los cultivos disminuye la capacidad de subsistencia de los agricultores (Cohen, et. al., 2006), afectando directamente los ingresos, limitando la inversión al campo y provocando pobreza, llevando a los productores y sus familias a una “trampa de pobreza” (Barret, et. al., 2015).

A pesar de sus implicaciones sociales y ambientales, la conservación de suelos no tiene un lugar en la agenda política mexicana (Cotler, et. al., 2010). Para que funcionen las reformas y políticas publicas requieren estar relacionadas con la realidad y los desafíos del desarrollo regional (Martínez, et. al., 2022).

En este trabajo se emplea la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (RUSLE) para la estimación de pérdida de suelos a nivel municipal, es uno de los métodos más utilizados para zonas más grandes que el parcelario (Cotler, et. al., 2010): conocer el grado de erosión de suelos puede brindar conocimientos de la sostenibilidad de un sistema (Alvarado, et. al., 2007), llevando a cabo investigación para la conservación (Gaspari , et. al., 2009); para la valoración económica de la erosión, Adhikari (2011), menciona el método de la función de producción para modelar la contribución física del recurso a la producción económica, en este estudio se utilizó esta metodología mediante un modelo de regresión lineal múltiple.

3.3 Materiales y métodos

3.3.1 Descripción de la zona de estudio

El estado de Hidalgo pertenece a una de las 32 entidades federativas de la República Mexicana. Se localiza en la región central de México, colindando con los estados de México, Tlaxcala, Puebla, Veracruz, San Luis Potosí y Querétaro. Hidalgo tiene una extensión de 20,813 kilómetros cuadrados (km) y se ubica

dentro de las coordenadas al norte 21° 24´, al sur 19° 36´ de latitud norte, al este 97° 58´ y al oeste 99° 53´ de longitud oeste (INEGI, 2020).



Figura 2. Ubicación del estado de Hidalgo

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI.

El estado presenta diferentes climas dentro de su extensión territorial siendo los predominantes: templado subhúmedo (31.42%), templado semiseco (29.65%), semicálido húmedo (16.23%), templado húmedo (6.05%), semicálido subhúmedo (5.76%), semicálido semiseco (4.92%), semicálido seco (3.83%), semifrío subhúmedo (0.93%), cálido subhúmedo (0.84%), cálido húmedo (0.2%) y semiseco muy cálido y cálido (0.17%). La temperatura media anual en este estado es de 16°C, destacando el mes más frío en enero con temperatura mínima alrededor de 4 °C y los más cálidos los meses de abril y mayo con temperatura máxima promedio de 27°C.

La precipitación media del estado es de 800 mm anuales. Las lluvias se presentan en verano, en los meses de junio a septiembre, al noreste de la entidad, en la región de la Huasteca y de la Sierra de Tenango, se presentan lluvias durante todo el año (INEGI, 2020).

Hidalgo se conforma principalmente por zonas agrícolas (44.4%), bosques (27%), matorrales (11.2%), pastizales (10.5%), selva (5.6%), además de otro tipo de vegetación, cuerpos de agua y zonas urbanas.

En cuanto a vegetación predomina en el territorio los bosques húmedos de montaña y los bosques de coníferas y encinos, localizados sobre las sierras. Las principales especies presentes son: ocote rojo, encino hoja ancha, mirra, oyamel y encino manzanilla (INEGI, 2020).

De manera general en los principales cultivos agrícolas se encuentra: frijol, chile, maíz, alfalfa y trigo (INEGI, 2020). Sin embargo, en el cierre de producción agrícola de 2022 del estado de Hidalgo los principales cultivos fueron maíz grano con 204609.08 ha cosechadas con un valor de 4,266,828.86 miles de pesos, cebada grano con 105,138.15 ha cosechadas de valor de 1,232,493.57 miles de pesos, y alfalfa con 43,996.80 ha cosechadas aproximadamente 1,448,233.47 de miles de pesos. En comparación con el cierre anual del 2012, dichos cultivos también se presentan como principales; sin embargo, presentó una entrada mayor el cultivo de maguey pulquero con un valor de 1,422,276.12 miles de pesos en comparación a los cultivos de cebada grano (945,404.09 miles de pesos) y alfalfa (1463722.31 miles de pesos) respectivamente (SIAP, 2023).

3.3.2 Cálculo de la erosión de suelos

La erosión de suelos se determinó mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, según López Cadenas del Llano (1998) como lo presenta Montés-León, et. al. (2011), se presenta a continuación:

$$A = R * K * L * S * C * P$$

donde:

A = Pérdida de suelo por erosión pluvial (ton/ha)

R = Factor índice de erosión pluvial (J*cm/m²*h);

K = Factor de erodabilidad del suelo (Mg m² h/ ha J cm);

LS = Factor topográfico,

C = Factor ordenación de cultivos;

P = Factor de control de erosión mediante prácticas de cultivo.

El factor R indica el potencial erosivo que tienen las precipitaciones, considerando la intensidad de la lluvia y la energía cinética, sin embargo, esto requiere datos de periodos cortos con los que no se cuenta, por lo que se optó hacer el cálculo mediante la ecuación regionalizada propuesta por Becerra (1997), donde se utilizó la ecuación de la región 1, esta ecuación presenta una R^2 de 0.92:

$$R = 1.2078 * P + 0.002276 * P^2$$

P = Precipitación media anual de cada municipio

El factor K se refiere a la susceptibilidad el suelo o resistencia de un horizonte del suelo a la erosión (Montés-León, et. al. , 2011), para este cálculo se utilizaron los datos de cada municipio acerca de su textura y el tipo de suelo de acuerdo con la clasificación de suelos del WRB (*World Reference Base for Soil Resources*).

El factor LS es la representación numérica del efecto de la topografía sobre la erosión, considerando la longitud y el grado de pendiente. Para determinar el valor de este factor se utilizó la metodología de Renard, en la cual:

$$L = \left(\frac{X}{22.13}\right)^m$$

Donde:

$$m = \frac{\beta}{1 + \beta}.$$

$$\beta = \frac{\frac{\text{sen}\theta}{0.0896}}{[3(\text{sen}\theta)^{0.8} + 0.56]}$$

θ es la pendiente del terreno.

Mientras que el factor S se evaluó de acuerdo con el grado de pendiente que presente:

$$S = 10.8 \operatorname{sen} \theta + 0.03 \quad \theta \leq 9\%$$

$$S = 16.8 \operatorname{sen} \theta - 0.50 \quad \theta > 9\%$$

El valor de LS se obtiene de la multiplicación de L y S obtenidos.

El valor del factor C fue el mismo para todos los municipios ya que solo está evaluando el uso de suelo con agricultura de temporal, este fue tomado de autores como Becerra (1997).

El factor P considera las prácticas de conservación de suelos; a pesar de eso, el valor considerado fue de $P=1$ ya que las bases de datos solo contienen datos de labranza de conservación y fertilidad de suelos, los cuáles no son considerados como prácticas de conservación en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos.

3.3.3 Diseño del modelo

Para relacionar la erosión hídrica de suelos con los rendimientos de maíz grano se realizó un modelo de Regresión Lineal Múltiple como técnica estadística:

$$y_j = b_0 + b_1x_{1j} + b_2x_{2j} + \cdots + b_kx_{kj} + u_j$$

Donde y será el rendimiento y x las variables exógenas, u los residuos y b los coeficientes estimados del efecto marginal entre cada x e y . Las variables exógenas del modelo fueron pérdida de suelo por erosión hídrica, porcentaje de productores que utilizan fertilizantes, porcentaje de productores que utilizan herbicidas, porcentaje de productores que tienen acceso a programas agrícolas, porcentaje de productores que tienen acceso a créditos y la precipitación media anual.

Las variables que no fueron significativas al modelo, por lo que no se consideraron en el modelo final fueron profundidad del suelo, grado de

mecanización, precio medio rural, asistencia técnica para la producción y aumento tecnológico en semillas.

Los datos obtenidos sobre el área de tecnología como lo son la fertilización del suelo con químicos u orgánicos y herbicidas químicos u orgánicos, originalmente se encontraban como porcentajes de productores que adoptaron estas prácticas, para utilizarlas en el modelo se aplicó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de mejora tecnológica de } x_i = \frac{\sum_1^j x_{ij} * P_{ij}}{n}$$

Donde x puede tomar los valores de fertilización (2) o herbicidas (3), y j es el grado de mejora tecnológica (Cuadro 1), y n es el valor mayor de mejora tecnológica para cada categoría.

Cuadro 1. Grados de mejora tecnológica considerados

X	Tecnología	Grado de mejora tecnológica
X2 j= 1,2	Fertilización	4. Orgánica 5. Química
X3 j=1,2	Herbicidas	1- Orgánico 2- Químico

Fuente: Elaboración propia.

La comprobación de la idoneidad del modelo obtenido se llevó a cabo calculando el coeficiente de determinación R^2 . El coeficiente de determinación se obtuvo mediante:

$$R^2 = \frac{S_Y^2}{S_y^2}$$

Donde se obtiene el cociente de las varianzas.

Se realizó un contraste de hipótesis sobre los parámetros del modelo, dónde para cada β_j se tiene una hipótesis nula ($H_0: \beta_j = 0$) y una hipótesis alternativa ($H_1: \beta_j \neq 0$). Se comprobó el rechazo de la hipótesis nula mediante el estadístico de contraste para todas las variables:

$$t = \frac{\hat{\beta}_j}{S_{\hat{\beta}_j}}$$

Donde los valores críticos de $\pm t_{\frac{\alpha}{2}; n-k-1}$, de forma que si t es mayor al t de tablas se rechaza la hipótesis nula y si t es menor al t de tablas no se rechaza la hipótesis nula.

Se obtuvo un modelo con 6 variables significativa que fueron la erosión hídrica, fertilización del suelo, uso de herbicidas, acceso a programas agrícolas, acceso a créditos y precipitación media anual

El contraste conjunto del modelo se realizó mediante el estadístico de contraste, el cual consiste en la observación de la distribución F cuando la hipótesis nula es cierta.

$$f = \frac{SCR/k}{SCE/(n-k-1)}$$

Dónde SCT es la suma de cuadrados, SCE es la suma de cuadrados de los errores y SCR es la suma de cuadrados de la regresión.

El criterio de decisión se realizó a través de un nivel de significación α , donde se busca el valor de F de tablas ($F_{\alpha; k; n-k-1}$) y si f es mayor al F de tablas se rechazará H_0

De esta forma se comprobó la viabilidad del modelo obtenido.

3.3.4 Pérdida económica de la producción

La medición el impacto económico de la erosión hídrica en la productividad del suelo se puede hacer mediante diferentes análisis como lo son la pérdida por disminución de la productividad, el costo asociado a la mitigación, conservación y/o restauración del suelo o el costo social del daño.

Para evaluar la pérdida económica por disminución de la productividad se utilizó la ecuación de Cotler, et. al., 2007, modificado para considerar el valor de pérdida por erosión (β_1) obtenido en la regresión, por lo que modificado se utilizó de la siguiente forma:

$$C_i = P_m * \beta_1 * E$$

Dónde:

C_i = Costo de la erosión por hectárea en cada municipio de estudio (\$).

P_m = Precio de mercado por tonelada de producto agrícola.

β_1 = Pérdida de producto en toneladas por hectárea asociada la erosión en toneladas por h

E = Erosión hídrica en toneladas por hectáreas obtenida por USLE

Por último, se calculó una media de pérdida económica en la producción de maíz grano por erosión hídrica de suelos con causa agrícola en el estado de Hidalgo.

3.3.5 Relación erosión hídrica de suelos y pobreza

Para relacionar las variables obtenidas con la pobreza y la carencia alimentaria se realizó un análisis de correlación, el cuál determinó si existe una asociación lineal entre la erosión de suelos, el índice de pobreza y la carencia alimentaria.

La erosión de suelos desde sus unidades de pérdida en toneladas por hectárea, el rendimiento del maíz grano en toneladas por hectárea, el costo por erosión hídrica de suelos por hectárea y total perdido por municipio.

El coeficiente de correlación de Pearson se destaca por dar una magnitud y signo, el primero refleja el nivel de asociación de las variables, en valor absoluto va del 0 al 1, donde el cero indica la inexistencia de asociación entre las variables. El signo por su parte, indica la dirección en que existe esta relación, un signo positivo indica que las variables van en el mismo sentido, es decir, si una variable aumenta, la otra también, mientras un signo negativo da a entender que el crecimiento de una variable disminuye la otra.

Este tipo de análisis a nivel país ya fue llevado a cabo por Cotler, et. al., (2020), por lo que se estableció seguir por este tipo de análisis para estas variables.

La correlación se puede calcular con la siguiente formula (Zar, 1999):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n XY - \frac{\sum_{i=1}^n X \sum_{i=1}^n Y}{n}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n X^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n X)^2}{n}\right) \left(\sum_{i=1}^n Y^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n Y)^2}{n}\right)}}$$

Es importante calcular el error estándar o un intervalo de confianza, así como una prueba de hipótesis para determinar si el coeficiente es estadísticamente diferente de cero; por lo tanto, el error estándar de la correlación se calcula con la siguiente formula:

$$S_r = \sqrt{\frac{1 - r^2}{n - 2}}$$

Mientras que la prueba de hipótesis se puede realizar con los siguientes supuestos:

- Hipótesis nula HO: $r = 0$
- Hipótesis alternativa H1: $r \neq 0$

El estadístico de prueba se calcula como:

$$t = \frac{r}{S_r}$$

Con los valores obtenidos de r , S_r y t se realizó una tabla para comparar los valores de cada dupla.

3.3.6 Recopilación de la información

El proceso completo se llevó a cabo utilizando bases de datos de instituciones públicas. Los datos obtenidos y sus fuentes son las siguientes (Cuadro 2):

Cuadro 2. Base de datos utilizada

Nombre	Información	Fuente	Año
Límites municipales	Municipios de Hidalgo	INEGI	-
Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000, serie VII. Conjunto Nacional	Agricultura de temporal	INEGI	2021
Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Escala 1:250,00, Serie II (Continuo Nacional)	Características edafológicas	INEGI	2012
“Degradación del suelo en la República Mexicana - Escala 1:250 000”	Profundidad del suelo, zonas con erosión hídrica.	IDEFOR	2012
Cierre Agrícola Municipal	Superficie sembrada Rendimientos de maíz grano en agricultura de temporal	SIAP	2012-2022

Normales climatológicas	Precipitación media anual (P)	CONAGUA	2012-2022
Informes de pobreza	Niveles de pobreza. Nivel de carencia alimentaria	CONEVAL	2015
Censo Agropecuario 2022	Tecnología en sector agrícola: Semillas, fertilización, herbicidas, etc.	INEGI	2022

Fuente: Elaboración propia con información de diversas fuentes.

3.4 Resultados y discusión

Los municipios estudiados son aquellos que cumplen con los requisitos de producción agrícola en temporal con algún grado de erosión hídrica por causas agrícolas (Figura 3). Se puede observar los municipios agrupados en tres áreas del estado, esto debido a sus características edafológicas y climatológicas de la zona.

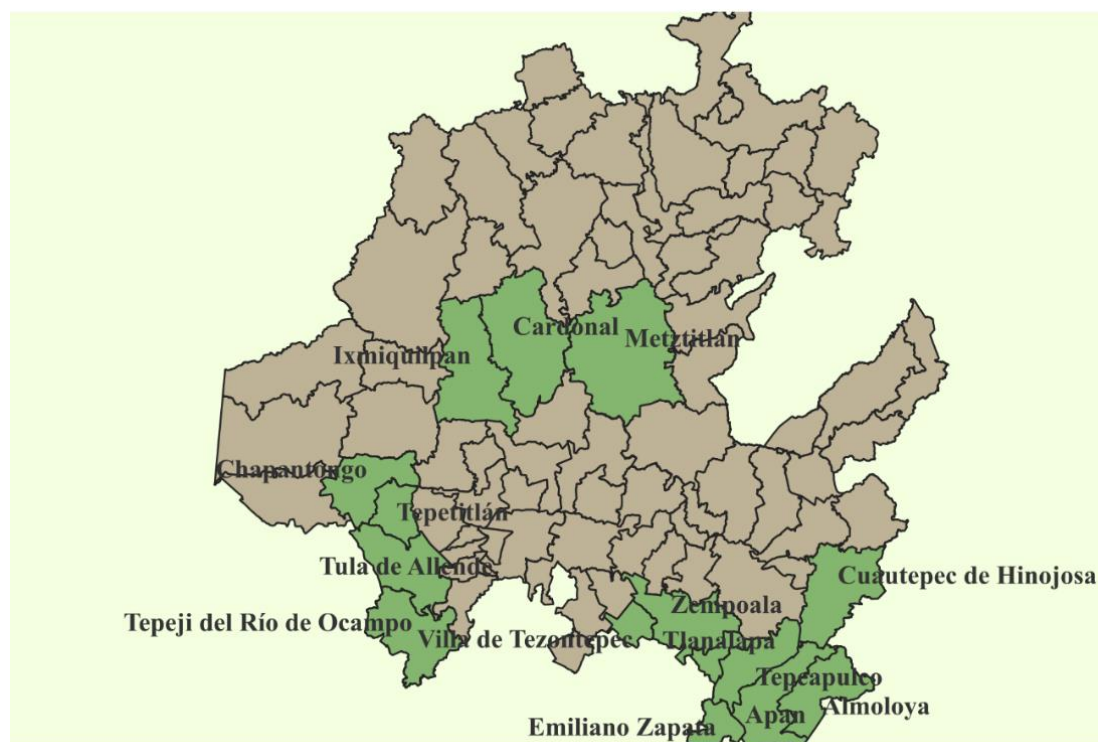


Figura 3. Municipios que reportan agricultura de temporal y erosión hídrica de suelos en Hidalgo

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI.

Los municipios escogidos coinciden con los mapas CONABIO (2012), en zonas donde domina la erosión laminar, la degradación de suelos moderada y severa, además, en la revisión de rendimientos del SIAP (2022), estos municipios se encuentran en todo el rango de rendimientos presentados.

3.4.1 Erosión hídrica calculada

Los municipios estudiados por su grado de erosión hídrica se presentan en el cuadro 3 donde se observa que la mayor parte de los municipios presenta un nivel de erosión calificado como fuerte presentando mayormente tipo de erosión hídrica laminar.

Cuadro 3. Grado de erosión hídrica de suelos de los municipios con agricultura de temporal de Hidalgo

N	Municipios	Tipo de erosión hídrica	Grado de erosión
1	Almoleya	Cárcavas	Extremo
2	Apan	Laminar	Fuerte
3	Cardonal	Laminar	Moderado
4	Chapatongo	Laminar	Fuerte
5	Cuautepec de Hinojosa	Laminar	Extremo
6	Emiliano Zapata	Surcos	Moderado
7	Ixmiquilpan	Laminar	Leve
8	Metztitlán	Laminar	Moderado
9	Tepeapulco	Cárcavas	Moderado
10	Tepeji del Río de Ocampo	Laminar	Fuerte
11	Tepetitlán	Laminar	Extremo
12	Tlanalapa	Laminar	Fuerte
13	Tula de Allende	Laminar	Fuerte
14	Villa de Tezontepec	Surcos	Moderado
15	Zempoala	Laminar	Fuerte

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI.

La precipitación media anual de la zona no tiene gran variación, se encuentra entre los 300 y 700 mm, adicionalmente se observó que el comportamiento de

las lluvias coincide con lo reportado en INEGI (2024) en el cual se menciona que las lluvias son más intensas entre los meses de junio, julio, agosto y septiembre (régimen de lluvia en verano), a pesar de eso, están debajo de la precipitación media del estado la cual es de 800 mm anuales, esto puede deberse a que en los municipios estudiados el clima predominante es el seco y semiseco (INEGI, 2024).

Recordando que el valor obtenido para la Erosividad (R) se obtuvo de la ecuación R, mediante la ecuación regionalizada propuesta por Becerra (1997); se presenta en un rango de 734.62 Mj.mm/ha.h con una precipitación media anual de 361.7 mm hasta 1893.14 Mj.mm/ha.h con una precipitación media anual de 684.5mm, es decir a mayor precipitación mayor valor de Erosividad de la lluvia (R) (Cuadro 4).

Cuadro 4. Factor de Erosividad de la lluvia (R)

Municipio	Factor R (MJ.mm/ha.h)
Almoloya	1893.14
Apan	1616.48
Cardonal	876.56
Cuautepec De Hinojosa	1613.67
Chapantongo	1376.25
Emiliano Zapata	1265.38
Ixmiquilpan	734.62
Metztitlán	888.89
Tepeapulco	1733.79
Tepeji Del Río De Ocampo	1302.36
Tepetitlán	1150.01
Villa De Tezontepec	996.27
Tlanalapa	1274.76
Tula De Allende	1203.03
Zempoala	1593.23

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 5. Factor de Erosividad del suelo (K)

Municipio	Tipo de suelo	Textura	Factor K
Almoloya	PH	F	0.007
Apan	PH	F	0.007

Cardonal	KS	F	0.026
Cuautepec De Hinojosa	PH	F	0.007
Chapantongo	PH	G	0.013
Emiliano Zapata	PH	G	0.013
Ixmiquilpan	LP	F	0.007
Metztitlán	LP	F	0.007
Tepeapulco	PH	F	0.007
Tepeji Del Río De Ocampo	PH	M	0.02
Tepetitlán	PH	G	0.013
Villa De Tezontepec	PH	G	0.013
Tlanalapa	PH	F	0.007
Tula De Allende	PH	F	0.007
Zempoala	PH	F	0.007

Fuente: Elaboración propia

El factor de Erosividad del suelo (K) fue valorado de acuerdo con el edafológico nacional y la clasificación de suelos que se reportan, los valores obtenidos muestran una variación entre el 0.007 y 0.026 tonh/MJ.mm (Cuadro 5).

El resultado del factor topográfico LS fue obtenido mediante los valores medios de longitud-pendiente de cada municipio. Este valor puede ser más alto entre más aumente el valor de la pendiente y la longitud que se presenta sea más corta. Los valores obtenidos presentaron una variación entre 1.37 con la pendiente media más baja y 26.37 en el municipio con la pendiente más pronunciada (Cuadro 6).

Cuadro 6. Factor topográfico longitud-pendiente (LS)

Municipio	Pendiente media	L	S	LS
Almoloya	0.19	2.18	2.67	5.82
Apan	0.34	2.54	5.10	12.98
Cardonal	0.60	2.26	8.99	20.30
Cuautepec De Hinojosa	0.29	2.19	4.30	9.42
Chapantongo	0.20	2.15	2.84	6.10
Emiliano Zapata	0.16	2.13	2.18	4.63
Ixmiquilpan	0.06	2.02	0.68	1.37
Metztitlán	0.80	2.28	11.55	26.37
Tepeapulco	0.11	2.09	1.34	2.81
Tepeji Del Río De Ocampo	0.08	2.05	0.89	1.83

Tepetitlán	0.20	2.15	2.84	6.10
Villa De Tezontepec	0.40	2.22	6.04	13.42
Tlanalapa	0.11	2.09	1.34	2.81
Tula De Allende	0.14	2.11	1.84	3.90
Zempoala	0.11	1.94	1.34	2.61

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó previamente el factor de vegetación y cultivo (C) y el factor de prácticas de conservación (P) fueron valores constantes, 0.75 y 1 respectivamente, debido a que solo se consideró el área de producción agrícola; por lo tanto, no existe otro uso de suelo a evaluar y no se cuentan con datos parcelarios de conservación de suelos.

El municipio con mayor valor de erosión hídrica es Cardonal (346.93 ton/ha/año), esto debido a que el valor que reporta del factor topográfico Longitud-Pendiente es de los más altos como resultado de que su pendiente es la más pronunciada (0.6) de los municipios estudiados, así mismo, el factor de Erosividad de suelos también es de los más altos debido a su tipo de suelo. El municipio que reporta menor erosión hídrica es Ixmiquilpan (5.29 ton/ha/año), contiene los valores más bajos en los tres factores calculados (R, K y LS) (Cuadro 7). El promedio de pérdida de suelo por erosión hídrica en los municipios estudiados es de 77.88 ton/ha/año, este valor de acuerdo con Montes-León, et. al. (2011) se considera en un rango de erosión media.

Cuadro 7. Valores de erosión por municipio

Municipio	Erosividad de la lluvia (R)	Erosividad del suelo (K)	Factor topográfico o longitud-pendiente (LS)	Factor de vegetación y cultivo (C)	Prácticas de conservación (P)	Erosión hídrica (ton/ha)
Ixmiquilpan	734.62	0.007	1.37	0.75	1	5.29
Zempoala	1593.23	0.007	2.61	0.75	1	21.86
Tepeapulco	1733.79	0.007	2.81	0.75	1	25.55
Tula De Allende	1274.76	0.007	3.90	0.75	1	26.09
Tlanalapa	996.27	0.013	2.81	0.75	1	27.26

Tepeji Del Río Ocampo	1302.36	0.02	1.83	0.75	1	35.83
Chapantongo	1613.67	0.007	6.10	0.75	1	51.71
Emiliano Zapata	1265.38	0.013	4.63	0.75	1	57.13
Almoloya	1893.14	0.007	5.82	0.75	1	57.80
Tepetitlán	1150.01	0.013	6.10	0.75	1	68.44
Villa De Tezontepec	1203.03	0.007	13.42	0.75	1	84.75
Apan	1616.48	0.007	12.98	0.75	1	110.12
Metztitlán	888.89	0.007	26.37	0.75	1	123.06
Cuautepec De Hinojosa	1376.25	0.013	9.42	0.75	1	126.41
Cardonal	876.56	0.026	20.30	0.75	1	346.93

Fuente: Elaboración propia

3.4.2 Modelo de regresión lineal múltiple para el maíz grano

Los rendimientos del maíz grano varían de 0.36 hasta 1.93 ton/ha en los municipios estudiados, es un valor bajo en contraste con la media nacional la cual es 3.6 ton/ha. Se observa que en general si hay una relación entre las variables estudiadas, sin embargo, la erosión por sí sola no explica el comportamiento del rendimiento del maíz grano, por lo que la erosión es la primera variable independiente (x_1) (Cuadro 9).

El rendimiento de los cultivos agrícolas se ve influencia por la precipitación, la fertilización del suelo, agroquímicos, inversión al campo y programas gubernamentales; por lo tanto, se realizó una regresión lineal múltiple, el modelo resultado es el siguiente, sus valores estadísticos se pueden observar en los cuadros 10 y 11:

$$R_m = -0.8774 - 0.0011ER + 0.0274F - 0.0105H + 0.0360AP + 0.0026AC \\ - 0.0015PMA$$

Donde

ER = Pérdida de suelo por erosión hídrica (ton/ha)

F = Productores que fertilizan el suelo (%)

H = Productores que utilizan herbicidas (%)

AP = Productores que tienen acceso a programas agrícolas (%)

AC = Productores que tienen acceso a créditos (%)

PMA = Precipitación media anual (mm)

Se observa que, mediante las betas calculadas, el acceso a programas agrícolas es una de las variables que afecta más al cambio en el rendimiento del maíz grano en Hidalgo y el segundo es la fertilización de suelos, así mismo la precipitación se vuelve un coeficiente negativo por su relación con la erosión de suelos.

Cuadro 8. Rendimiento del maíz grano y erosión calculada

Municipio	Rendimiento (ton/ha)	Erosión (ton/ha)
Tepeji del Río de Ocampo	0.36	35.83
Tepetitlán	0.38	68.44
Tula de Allende	0.38	26.09
Metztlán	0.49	123.06
Cardonal	0.62	346.93
Villa de Tezontepec	0.65	84.75
Ixmiquilpan	0.83	5.29
Cuautepec de Hinojosa	0.95	126.41
Chapatongo	0.98	51.71
Zempoala	1.00	21.86
Almoleña	1.38	57.80
Tlanalapa	1.45	27.26
Apan	1.78	110.12

Tepeapulco	1.87	25.55
Emiliano Zapata	1.93	57.13

Fuente: Elaboración propia.

La fertilización del suelo es un insumo que tiene una relación directa con los rendimientos, como se observa en la Figura 4, empero, hay otros factores que disminuyen los rendimientos a pesar de que los porcentajes de aplicación de fertilización de suelos sean altos; Ávila (2001) menciona que el sector agrícola ha pagado más por las materias primas que utiliza, como los fertilizantes, que por lo recibido en la venta de su producto.

Al evaluar el comportamiento de los datos elegidos se observa la existencia de una relación fuerte entre el rendimiento y la fertilización de suelos (Figura 4), no obstante, existen municipios que aún con un porcentaje alto de fertilización de suelos presentan rendimientos bajos, por lo que se siguieron revisando cada una de las variables.

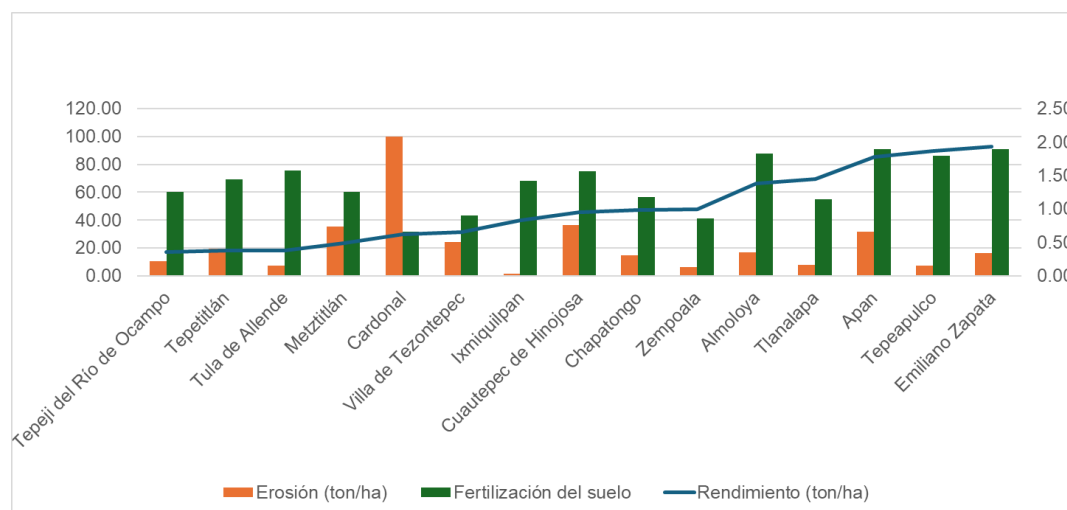


Figura 4. Comportamiento de los rendimientos de maíz grano de acuerdo con la fertilización del suelo y erosión hídrica en una escala municipal.

Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera.

En los herbicidas es más notorio que su aplicación está relacionada con la disminución de los rendimientos del maíz (Figura 5) y podría realizarse una revisión del uso de este químico para ver si su uso ha aumentado con el tiempo, o se aplican buenas prácticas, porque los herbicidas son benéficos para la agricultura siempre que se utilicen las dosis correctas y se lleve un manejo adecuado, en caso contrario, los herbicidas pueden dañar la salud de las plantas y el microbiota del suelo.

La relación entre rendimientos y acceso a programas no es tan notoria (Figura 6); se observa que los valores más altos de acceso a programas se acumulan con los rendimientos arriba del promedio, volviéndose una variable positiva. Existen municipios que presentan valores bajos de esta variable y con altos rendimientos, lo que podría estar relacionado con el ingreso del productor o su capacidad de inversión a la producción.

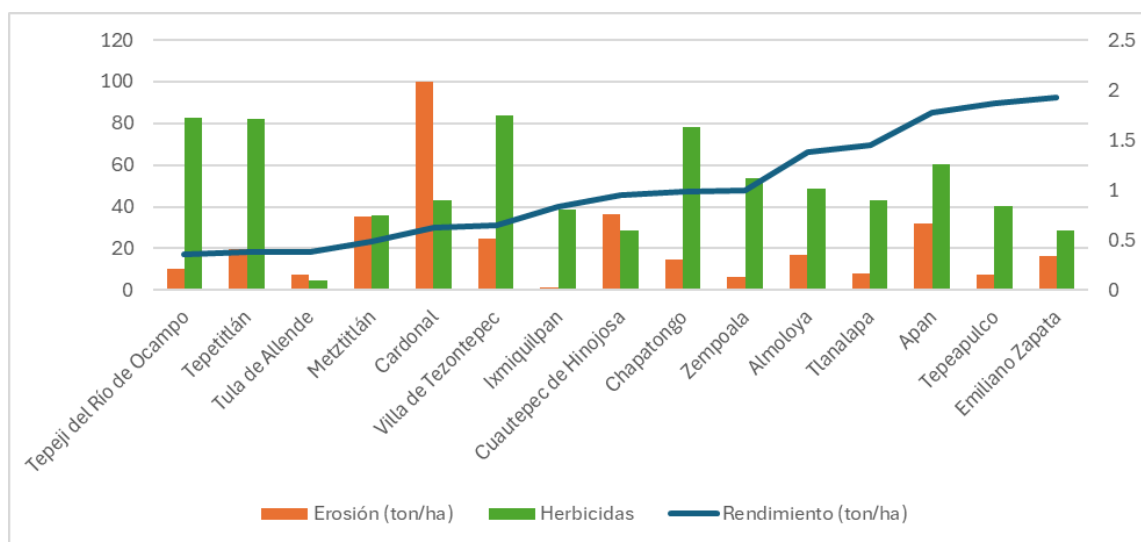


Figura 5. Comportamiento de los rendimientos de maíz de acuerdo con el uso de herbicidas y erosión hídrica en una escala municipal.

Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera.

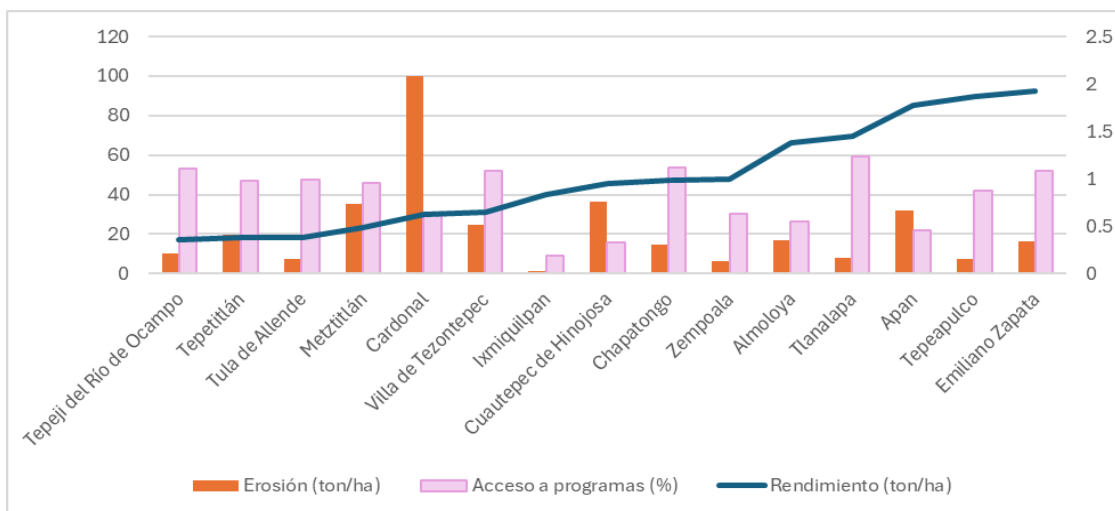


Figura 6. Comportamiento de los rendimientos de maíz de acuerdo con el acceso a programas agrícolas y erosión hídrica en una escala municipal.

Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera.

El acceso a créditos es uno de los factores que afecta más al rendimiento agrícola (Figura 7), el acceso a los créditos brinda opciones de inversión para el productor, lo que mejora los rendimientos y la calidad del producto.

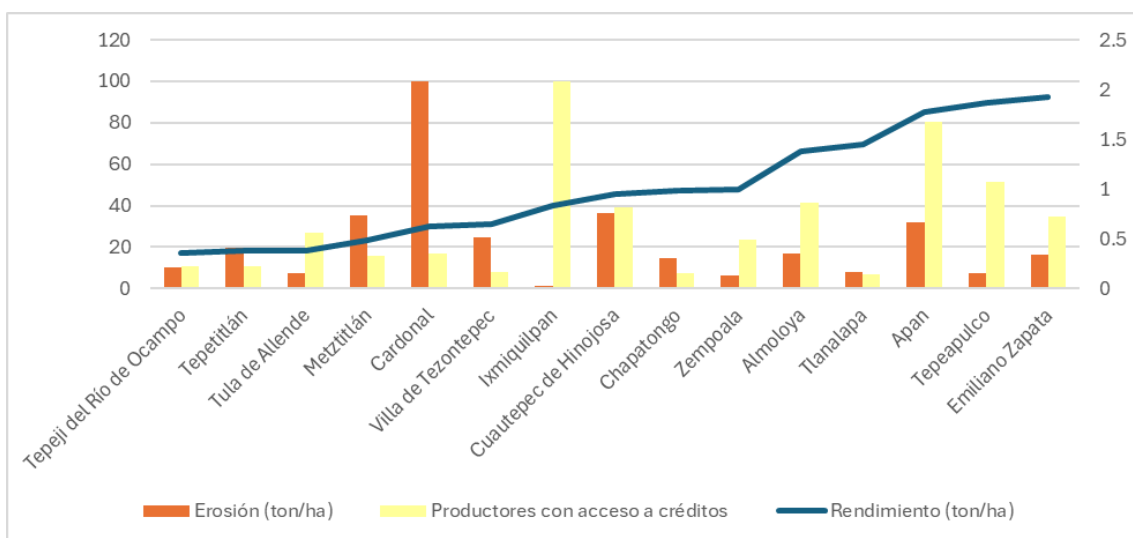


Figura 7. Comportamiento de los rendimientos de maíz de acuerdo con el acceso a créditos y erosión hídrica en una escala municipal.

Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera.

Por último, se observa que la precipitación no es una variable de gran variabilidad en la zona observada (Figura 8), adquiriendo un valor negativo o positivo al tener variables que afectan con mayor magnitud a la variable rendimiento; sin embargo, es una variable a incluir en el modelo, porque muchos autores mencionan que la precipitación es uno de los factores que más afectan a la producción de maíz grano en México, de igual modo es una variable relacionada con la erosión hídrica por lo que puede tener un comportamiento negativo en el modelo. Eliminar esta variable del modelo disminuye la confiabilidad de este por lo que se mantuvo en el modelo.

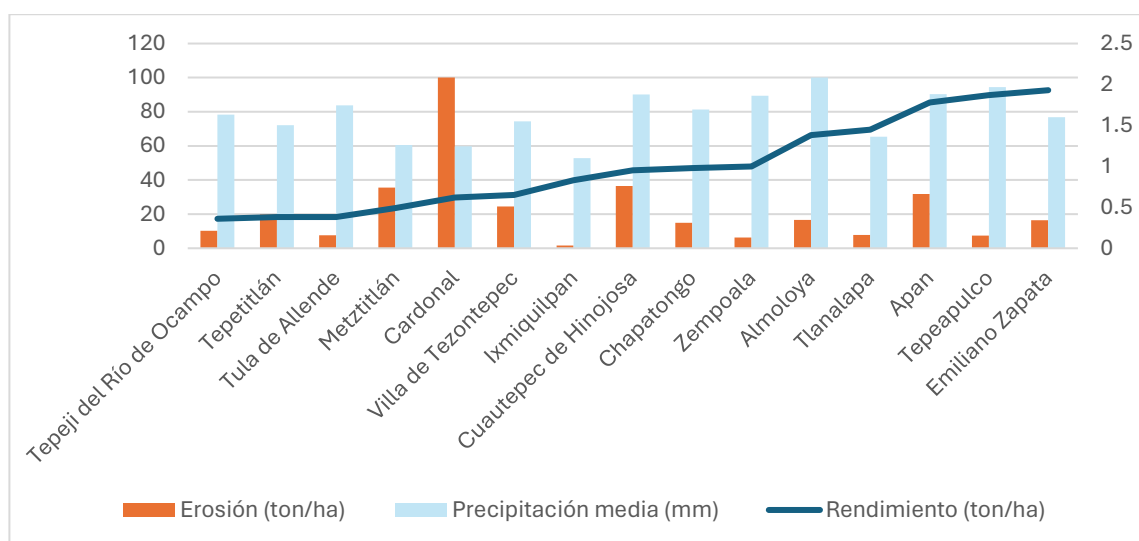


Figura 8. Comportamiento de los rendimientos de maíz de acuerdo con la precipitación media anual y erosión hídrica en una escala municipal.

Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera.

Las betas se eligieron considerando el estadístico t que presentaron en el modelo considerando 2 o más variables y rechazando o aceptando la hipótesis nula de cada β estudiado (Cuadro 8). El t de tablas se obtuvo con un $\alpha=0.1$ y los grados

de libertad $gl=8$ ($n-k-1$). Se concluye que se tendrán 5 variables independientes y todas son representativas para el modelo.

Las estadísticas de la regresión arrojan que el coeficiente de correlación múltiple es de 0.97, este valor explica si el comportamiento del rendimiento del maíz grano se puede determinar mediante una función lineal de acuerdo con las variables elegidas. El coeficiente de determinación del modelo (R^2) obtenido es mayor a 0.9 (Cuadro 10), significa que el modelo tiene un buen ajuste de los datos; asimismo, las observaciones difieren de la media poblacional (1 ton/ha) en 0.16 unidades; no obstante, esto no establece la confiabilidad del modelo, por lo tanto, también se calculó el valor de la prueba de F mediante un análisis de varianza (Cuadro 11).

Cuadro 9. Estadístico t de las β del modelo

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	-0.877	0.3740	-2.346	0.047
Erosión (ton/ha)	-0.001	0.0007	-1.603	0.148
Fertilización del suelo	0.025	0.0080	3.177	0.013
Herbicidas	-0.011	0.0068	-1.555	0.159
Acceso a programas (%)	0.036	0.0043	8.438	0.000
Productores con acceso a créditos	0.003	0.0008	3.326	0.010
PMA	-0.002	0.0007	-2.276	0.052

Fuente: Elaboración propia con los datos obtenidos.

El modelo obtuvo un coeficiente de correlación múltiple de 0.97 y un R^2 ajustado de 0.90, con un error típico de 0.16. El f de tablas calculado con un $\alpha=0.1$ y 8 grados de libertad es de 2.67, se observa que $f > F_{\alpha; k; n-k-1}$, por lo que se rechaza H_0 , y se concluye que el modelo explica significativamente el rendimiento del maíz grano en el estado estudiado.

Se acepta el modelo.

3.4.3 Pérdida económica por erosión de suelos

El valor calculado de pérdida en el rendimiento de maíz grano (β_1) es de 0.001083 toneladas por hectárea, por año, por cada tonelada que se pierda de suelo; así los costos por municipio quedan de la siguiente manera (Cuadro 10):

Cuadro 10. Pérdida económica por erosión hídrica por hectárea

Municipios	Erosión (ton/ha/año)	Rendimiento perdido (ton/Ha/año)	Precio de venta (\$)	Pérdida económica (\$/ha)
Ixmiquilpan	5.29	0.01	4373	25.02
Zempoala	21.86	0.02	6908	163.49
Tepeapulco	25.55	0.03	6900	190.84
Tlanalapa	27.26	0.03	6905	203.80
Tula de Allende	26.09	0.03	7500	211.81
Tepeji del Río de Ocampo	35.83	0.04	7440	288.60
Chapatongo	51.71	0.06	6967.65	390.01
Emiliano Zapata	57.13	0.06	6875.639	425.24
Almoloya	57.80	0.06	6894.8244	431.38
Tepetitlán	68.44	0.07	7450	551.92
Villa de Tezontepec	84.75	0.09	6890	632.11
Metztitlán	123.06	0.13	5118.09	681.84
Apan	110.12	0.12	6512.10955	776.31
Cuautepec de Hinojosa	126.41	0.14	6927.24	947.98
Cardonal	346.93	0.38	4430	1663.73
Promedio	77.9	0.1	6539.4	422.9
Desviación estándar	83.51	0.09	1028.95	265.92

Fuente: Elaboración propia con los datos obtenidos.

La pérdida económica va desde los 25 pesos por hectárea hasta 1663 pesos por hectárea, si por hectárea se produce en promedio una tonelada que tiene un precio promedio de 6540 pesos, implica que la pérdida económica por erosión de

suelos puede ascender hasta un 25% de la producción. Comparado con otros países como España, la pérdida económica por erosión puede representar el 6.6% al 7.8% del ingreso de la producción (Martínez-Casasnovas, et. al., 2006).

Otras investigaciones en México mencionan que se pierden entre 38.3 a 54.5 dólares por hectárea a nivel nacional (Cotler, et. al., 2007), los resultados de Hidalgo indican que se pierden entre 1.29 dólares hasta 85 dólares por hectárea, mientras el promedio es de 24.43 dólares por hectárea.

Cuadro 11. Pérdida económica por erosión de suelos por municipio

Municipios	Superficie cosechada (ha)	Producción perdida (ton/ha)	Total perdido por municipio (\$)
Ixmiquilpan	678	3.88	16966.2
Tlanalapa	136	4.01	27716.7
Villa de Tezontepec	53	4.86	33502.0
Emiliano Zapata	149	9.20	63276.4
Tepeapulco	352	9.74	67174.0
Almoloya	430	26.90	185493.0
Zempoala	1621	38.36	265013.7
Tepetitlán	489	36.23	269888.7
Tula de Allende	1483	41.88	314111.1
Tepeji del Río de Ocampo	1639	63.58	473010.2
Apan	837	99.78	649771.8
Chapatongo	2195	122.86	856070.5
Metztitlán	1765	235.13	1203439.1
Cardonal	1598	600.15	2658643.2
Cuautepec de Hinojosa	4630	633.60	4389113.5

Fuente: Elaboración propia con los datos obtenidos.

De igual manera se calcularon los costos totales anuales por erosión hídrica de suelos, de acuerdo con la superficie cosechada para el año 2022. Los municipios en ambos cuadros (Cuadro 10 y 11) están organizados en orden de menor a mayor en pérdida económica calculada.

La erosión de suelos está directamente relacionada con las condiciones edafológicas y climatológicas de cada lugar, por lo que es un riesgo latente su incremento. De acuerdo con el uso de suelo y las buenas prácticas de conservación; si no se presentan estas prácticas la producción pérdida puede ascender. Las prácticas de fertilización y el uso de agroquímicos no presentan una solución a la pérdida de suelo, por lo que, aunque aumenten los rendimientos, no necesariamente son una solución a largo plazo, y no ayudan a la regeneración del suelo, volviéndolo un recurso limitado.

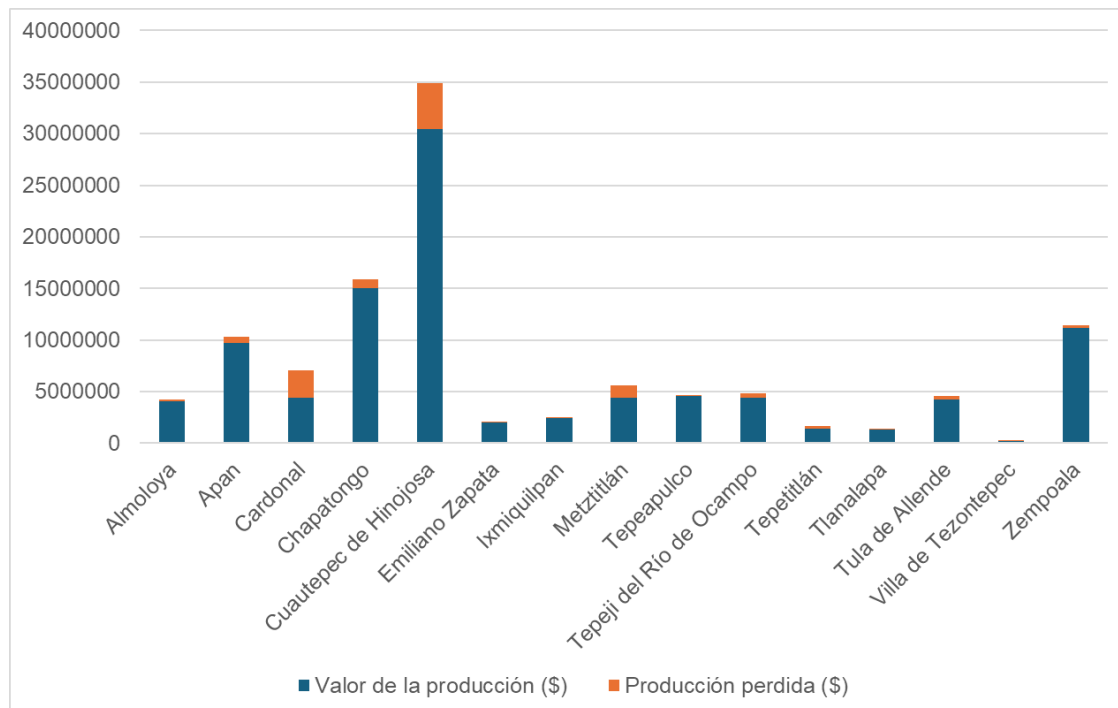


Figura 9. Valor de la producción y producción pérdida (\$) por erosión hídrica de suelos de maíz grano en Hidalgo.

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos

3.4.4 Erosión de suelos y pobreza

Los resultados del análisis de correlación muestran para el estado de Hidalgo la existencia de una correlación medianamente significativa con los índices de pobreza, pero no con los índices de carencia alimentaria; esta correlación tiene

un promedio de 0.42, mientras la correlación con carencia alimentaria tiene un valor de 0.2; la prueba de hipótesis determina que la correlación no es significativa para carencia alimentaria; pero si es significativa para pobreza.

Cuadro 12. Análisis de correlación de Pearson (r) de la erosión de suelos, pobreza y carencia alimentaria.

X	Y	r	Sr	t	Prueba de hipótesis
Perdida de rendimiento	Pobreza	0.434	0.250	1.737	Se rechaza H0
	Carencia alimentaria	0.249	0.269	0.926	Se acepta H0
Costo por hectárea	Pobreza	0.384	0.256	1.498	Se rechaza H0
	Carencia alimentaria	0.123	0.275	0.445	Se acepta H0
Costo por municipio	Pobreza	0.445	0.248	1.789	Se rechaza H0
	Carencia alimentaria	0.247	0.269	0.919	Se acepta H0

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos

La correlación entre la pérdida económica y la carencia alimentaria calculada coincide con los de otros autores para Hidalgo, a nivel nacional se reporta que esta correlación puede llegar a un valor de $r = 0.65$ (Cotler, et. al., 2020). Se puede observar una relación más fuerte con los niveles de pobreza, debido a que el calculo de la pobreza en México considera muchos factores, siendo uno de los principales, el ingreso. Este es afectado por la disminución de los rendimientos, a menos producción, menos ingresos.

3.5 Conclusiones

Los costos de la erosión de suelos obtenidos en este estudio reflejan su impacto en la productividad agrícola, considerando al suelo un recurso de la producción y no un sistema.

Se estimó que se pierden 0.0011 toneladas por hectárea por año de maíz grano por cada tonelada perdida de suelo debido a la erosión hídrica en las zonas de producción agrícola en el estado de Hidalgo. En el modelo se observa que la

tecnología más aplicada en esta zona agrícola son los fertilizantes, aun así, estos no resuelven el problema de pérdida de suelos.

Los resultados señalan que se puede perder desde una cantidad mínima (25 pesos mexicanos) hasta un 25% del valor de la producción (1663 pesos mexicanos), y que entre mayor sea la cantidad de hectáreas en producción y el valor de erosión más alto, mayor será la pérdida económica.

Cuando la erosión es muy alta influye en la pobreza de los agricultores ($r=0.42$), por lo que se vuelve una variable a tratar cuando se requiere realizar políticas públicas con la intención de mejorar las condiciones socioeconómicas de la población rural.

3.6 Literatura citada

- Adhikari, B., & Nadella, K. (2011). Ecological economics of soil erosion: a review of the current state of knowledge. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1219(1), 134-152. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05910.x>
- Alvarado Cardona, M., Colmenero Robles, A., & Valderrábano Almegua, M. (2007). La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el Estado de Tlaxcala. *Ciencia Ergo Sum*, 14(3), 317-216.
- Ávila, J. A. (2001). El mercado de los fertilizantes en México. Situación actual y perspectivas. *Problemas del Desarrollo*, 189-207.
- Bakker, M. M., Govers, G., & Rounsevell, M. D. (2004). The crop productivity-erosion relationship: an analysis based on experimental work. *CATENA*, 55-76
- Barbier, E. B. (1997). The economic determinants of land degradation in developing countries. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 352(1356), 891-899.
- Barret, C. B., & Bevis, L. E. (2015). The self-reinforcing feedback between low soil fertility and chronic poverty. *Nature Geoscience*, 907-912.
- Becerra, M. (1997). Erosión de suelos. D.F.: Universidad Autónoma Chapingo
- CONABIO. (2012). Degradación del suelo en la República Mexicana - Escala 1:250 000. Obtenido de CONABIO: <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/degra250kgw.html>
- Cohen, M. J., Brown, M. T., & Shepherd, K. D. (2006). Estimating the environmental costs of soil erosion at multiple scales in Kenya using energy synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 114, 249-269. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.10.021>
- Cotler Avalos, H., & Martínez Trinidad, S. (2010). An Assessment of Soil Erosion Costs in Mexico. En P. Zdruli, S. Kapur, M. Pagliai, & A. Faz Cano, *Land*

- Degradation and Desertification: Assessment, Mitigation and Remediation (págs. 639-648). Bari: Springer.
- Cotler, H., Alfonso Corona, J., & Galeana Pizaña, J. (2020). Erosión de suelos y carencia alimentaria en México: Una primera aproximación. *Investigaciones geográficas*.
- Cotler, H., Andrés López, C., & Martínez Trinidad, S. (2007). ¿Cuánto nos cuesta la erosión de suelos? *Investigación ambiental*, 18-30.
- Enters, T. (1998). Methods for the economic assessment of the on- and off-site impacts of soil erosion. International Board for Soil Research and Management.
- Francisco Nicolás, N., Turrent Fernández, A., Oropeza Mota, J., Martíne Menes, M. R., & Cortés Flores, J. I. (2006). Pérdida de suelo y relación erosión-productividad en cuatro sistemas de manejo del suelo. *Terra Latinoamericana*, 24(2), 253-260.
- Gaitán, J., Navarro, M., Tenti, V. L., Pizarro, M., Carfagno, P., & Rigo, S. (2017). Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina. Buenos Aires: INTA.
- Gaspari, F. J., Delgado, M. I., & Denegri, G. A. (2009). Estimación espacial, temporal y económico de la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial. *Terra Latinoamericana*, 27(1), 43.
- Gisladdottir, G., & Stocking, M. (2005). Land degradation control and its global environmental benefits. *Land Degradation & Development*, 16, 99-112. doi:10.1002/ldr.68
- INEGI. (2020). Cuentame INEGI. Obtenido de Información por entidad: <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/hgo/territorio/>
- INEGI. (2024). Climatología. Obtenido de Geografía y Medio Ambiente: <https://www.inegi.org.mx/temas/usopsuelo/>
- Jayanath, A., & Gamini, H. (2003). Soil erosion in developing countries: a socio-economic appraisal. *Journal of Environmental Management*, 68, 343-353.
- Knowler, D. J. (2004). The economics of soil productivity: Local, national and global perspectives. *Land Degradation & Development*, 15, 543-561. doi:10.1002/ldr.635
- Lal, R. (2008). Soils and sustainable agriculture. A review. *Agronomy, Sustainability and Development*, 57-64
- Martínez-Casasnovas, J. A., & Ramos, M. (2006). The cost of soil erosion in vineyard fields in the Penedès-Anoia Region. *Catena*, 68, 194-199.
- Montanarella, L. (2007). Trends in Land Degradation in Europe. En V. Mannava, K. Sivakumar, & N. Ndiang'ui, *Climate and Land Degradation* (págs. 83-104). Berlin: Springer.
- Montés-León, M. L., Uribe Alcántara, E. M., & García-Celis, E. (2011). Mapa Nacional de Erosión Potencial. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5-17.
- Pérez-Nieto, J., Volke-Heller, V., Martínez-Menes, M., & Estrella-Chullin, N. (1998). Erosión, productividad y rentabilidad de dos suelos del estado de Oaxaca. *Agrociencia*, 113-118.

- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., . . . Blair, R. (1995). Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits. *Science*, 267, 1117-1123.
- Santos Telles, T., Guimaraes, M., & Falci Dechen, S. C. (2011). The costs of soil erosion. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. doi: 10.1590/S0100-06832011000200001
- SIAP. (2022). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Obtenido de Avance de Siembras y Cosechas. Resumen por estado: http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do
- Silva Arroyave, S. M., & Correa Restrepo, F. (2010). Valoración económica del suelo y gestión ambiental: Aplicación en empresas floricultoras colombianas. *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas de la Universidad Militar de Granada*, 247-26
- Sequeira, N., & Vázquez, P. (2022). Impacto de la erosión hídrica sobre la rentabilidad de los productores agrícolas en el partido de Tres Arroyos, Región Pampeana Austral, Argentina. *Revista Geográfica de América Central*.
- Tegtmeier, E. M., & Duffy, M. D. (2004). External costs of agricultural production in the United States. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2(1), 1-20.
- Zar, J. (1999). *Biostatistical Analysis* (Vol. 4th Ed). New Jersey: Prentice Hall.

4. Conclusiones generales

La erosión de suelos es una problemática que debe ser investigada a mayor profundidad, pero no solo desde las consecuencias directas sobre los cultivos; sino considerar las externalidades, las cuales no afectan directamente a la producción.

Este tipo de estudios concluyen que la degradación ambiental si afecta la productividad del sector primario al disminuir la calidad de los insumos que este utiliza. Además, el perjuicio sobre la producción afecta la calidad de vida de los mismos productores que no tendrán ingresos para invertir en su subsistencia y aun menos en su producción, por lo que no usarán medidas de mitigación de la degradación o la conservación de los recursos, esto causará la disminución de los rendimientos y motivará a la producción en menos superficie.

El maíz grano es importante en la producción de México y en la mayoría de los estados, mediante este cultivo y otros granos básicos se ha buscado la seguridad alimentaria; no obstante, el rendimiento de maíz grano ha presentado una disminución en los municipios con erosión hídrica de suelos con caudal agrícola, una tonelada pérdida de suelo representa la reducción de 1kg en los rendimientos; este dato inquieta cuando se observa que la mínima pérdida de suelo ronda 5 toneladas por hectárea y puede llegar hasta los 347 toneladas, esto se traduce en una merma en los rendimientos de 5 kg hasta los 347 kg, la preocupación se hace más intensa cuando la zona de estudio tiene un promedio de rendimientos en maíz grano de 1 tonelada por hectárea.

Adicionalmente, se observa que la superficie sembrada también influye en con las condiciones socioeconómicas, el valor obtenido de correlación con la perdida general de municipio tiene un valor más alto que la perdida por hectárea, esto se relaciona con la superficie cosechada en cada municipio, y en el análisis de datos se puede observar la disminución de la superficie sembrada a través del tiempo.

Los datos también indican que el sector agrícola, principalmente en la producción de maíz grano, se ha debilitado, y aunque los programas y la tecnología ayudan

a mejorar los rendimientos, el impacto ambiental debe considerarse en la toma de decisiones para aumentar el bienestar de la población quienes realizan estas actividades; este estudio se reduce a un solo servicio ambiental y un solo impacto social; por lo tanto, urge que investigadores ambientales, económicos y sociales se unan para apoyar a la creación de políticas que ataquen los tres rubros desde la sustentabilidad.

5. Literatura citada

- Adhikari, B., y Nadella, K. (2011). Ecological economics of soil erosion: a review of the current state of knowledge. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1219(1), 134-152. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05910.x>
- Alvarado C, M., Colmenero Robles, A., & Valderrábano Almegua, M. (2007). La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el Estado de Tlaxcala. *Ciencia Ergo Sum*, 14(3), 317-216.
- Ávila, J. A. (2001). El mercado de los fertilizantes en México. Situación actual y perspectivas. *Problemas del Desarrollo*, 189-207.
- Bakker, M. M., Govers, G., & Rounsevell, M. D. (2004). The crop productivity-erosion relationship: an analysis based on experimental work. *CATENA*, 55-76.
- Banco Mundial. (1996). *African Development Indicators*. Washington: Banco Mundial.
- Bänziger, M., Edemeades, G. O., Beck, D., & Bellon, M. (2012). De la teoría a la práctica. Mejoramiento para aumentar la tolerancia a sequía y a deficiencia de nitrógeno en el maíz. *Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo*.
- Barbier, E. B. (1997). The economic determinants of land degradation in developing countries. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 352(1356), 891-899.
- Barret, C. B., & Bevis, L. E. (2015). The self-reinforcing feedback between low soil fertility and chronic poverty. *Nature Geoscience*, 907-912.
- Becerra, M. (1997). *Erosión de suelos*. D.F.: Universidad Autónoma Chapingo.
- Bullock, J. M., Dhanjal-Adams, K. L., Milne, A., Oliver, T. H., Todman, L. C., Whitmore, A. P., & Pywell, R. F. (2017). Resilience and food security: rethinking an ecological concept. *Journal of Ecology*, 105(4), 880-884. doi:<https://doi.org/10.1111/1365-2745.12791>
- Cohen, M. J., Brown, M. T., & Shepherd, K. D. (2006). Estimating the environmental costs of soil erosion at multiple scales in Kenya using energy synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 114, 249-269. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.10.021>
- CONABIO. (2012). *Degradación del suelo en la República Mexicana - Escala 1:250 000*. Obtenido de CONABIO: <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/degra250kgw.html>
- CONABIO. (2020). *Biodiversidad natural y cultural*. Obtenido de Razas de maíz de México: <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices/razas-de-maiz>
- Cotler A., H., y Martínez T., S. (2010). An Assessment of Soil Erosion Costs in Mexico. En P. Zdruli, S. Kapur, M. Pagliai, & A. Faz Cano, *Land Degradation and Desertification: Assessment, Mitigation and Remediation* (págs. 639-648). Bari: Springer.

- Cotler, H., Alfonso Corona, J., & Galeana Pizaña, J. (2020). Erosión de suelos y carencia alimentaria en México: Una primera aproximación. *Investigaciones geográficas*.
- Cotler, H., Andrés López, C., & Martínez Trinidad, S. (2007). ¿Cuánto nos cuesta la erosión de suelos? *Investigación ambiental*, 18-30.
- Data México. (2023). *Trabajadores en Actividades Agrícolas y Ganaderas*. Obtenido de Data México: <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/occupation/trabajadores-en-actividades-agricolas-y-ganaderas>
- Enters, T. (1998). *Methods for the economic assessment of the on- and off-site impacts of soil erosion*. International Board for Soil Research and Management.
- FAO. (2024). *Portal de Suelos de la FAO*. Obtenido de Suelos Ácidos: <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-acidos/es/>
- Francisco Nicolás, N., Turrent Fernández, A., Oropeza Mota, J., Martíne Menes, M. R., & Cortés Flores, J. I. (2006). Pérdida de suelo y relación erosión-productividad en cuatro sistemas de manejo del suelo. *Terra Latinoamericana*, 24(2), 253-260.
- Freeman, A. M. (1983). Air and Water Pollution Control: A Benefit-Cost Assessment. *American Journal of Agricultural Economics*, 839-840.
- Gaitán, J., Navarro, M., Tenti, V. L., Pizarro, M., Carfagno, P., & Rigo, S. (2017). *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina*. Buenos Aires: INTA.
- Gaspari, F. J., Delgado, M. I., & Denegri, G. A. (2009). Estimación espacial, temporal y económico de la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial. *Terra Latinoamericana*, 27(1), 43.
- Gisladdottir, G., & Stocking, M. (2005). Land degradation control and its global environmental benefits. *Land Degradation & Development*, 16, 99-112. doi:10.1002/ldr.687
- Górdon Mendoza, R. (2012). *Manejo integral del cultivo de maíz*. Panamá: Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá.
- Gordón-Mendoza, R. (2020). Variabilidad climática y su efecto sobre la producción de maíz. *Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá*.
- Hernández Baltazar, I. (2014). *La Milpa. Catálogo de la diversidad regional. Huasteca Hidalguense*. México: Centro de Estudios para el Cambio en el Campo Mexicano.
- IFAD. (2001). *Rural poverty report. The challenge of ending rural poverty*. Rome: Oxford University Press and the International Fund for Agricultural Development (IFAD).
- INEGI. (2007). *INEGI*. Obtenido de VIII Censo Agropecuario: <https://www.inegi.org.mx/programas/cagf/2007/>
- INEGI. (2020). *Cuentame INEGI*. Obtenido de Información por entidad: <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/hgo/territorio/>
- INEGI. (2020). *Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo Nueva Edición*. Hidalgo: Gira de Trabajo.
- INEGI. (2022). *Censo Agropecuario*. Hidalgo: INEGI.

- INEGI. (2022). *Producto Interno Bruto por Entidad Federativa. Hidalgo*. Hidalgo: INEGI.
- INEGI. (2024). *Climatología*. Obtenido de Geografía y Medio Ambiente: <https://www.inegi.org.mx/temas/usopsuelo/>
- Jastrzebska, M., Kostrzevska, M. K., Marks, M., Jastrzebski, W. P., Treder, K., & Makowski, P. (2019). Crop Rotation Compared with Continuous Rye Cropping for Weed Biodiversity and Rye Yield. A Case Study of a Long-Term Experiment in Poland. *Agronomy*, 1-17.
- Jayanath, A., & Gamini, H. (2003). Soil erosion in developing countries: a socio-economic appraisal. *Journal of Environmental Management*, 68, 343-353.
- Knowler, D. J. (2004). The economics of soil productivity: Local, national and global perspectives. *Land Degradation & Development*, 15, 543-561. doi:10.1002/ldr.635
- Lal, R. (2008). Soils and sustainable agriculture. A review. *Agronomy, Sustainability and Development*, 57-64.
- López Báez, W., Reynoso Santos, R., López Martínez, J., Villar Sánchez, B., Camas Gómez, R., & García Santiago, J. (2019). Caracterización físico química de suelos cultivados con maíz en Villaflores, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(4).
- Martínez Chapa, O., & Salazar Castillo, J. E. (2022). Desafíos presentes en el México rural: problemas y posibilidades. *Espacio Abierto*, 31(3), 87-105.
- Martínez-Casasnovas, J. A., & Ramos, M. (2006). The cost of soil erosion in vineyard fields in the Penedès-Anoia Region. *Catena*, 68, 194-199.
- Montanarella, L. (2007). Trends in Land Degradation in Europe. En V. Mannava, K. Sivakumar, & N. Ndiang'ui, *Climate and Land Degradation* (págs. 83-104). Berlin: Springer.
- Montesillo Cedillo, J. L. (2020). Análisis retrospectivo de la producción agrícola de maíz grano en México bajo riego y temporal 1980-2010. (C. M. (COMEL), Ed.) *Serie de Seminarios Virtuales*, 41.
- Montés-León, M. L., Uribe Alcántara, E. M., & García-Celis, E. (2011). Mapa Nacional de Erosión Potencial. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5-17.
- Mundo-Rosas, V., Shamah-Levy, T., & Rivera-Dommarco, J. A. (2013). Epidemiología de la inseguridad alimentaria en México. *Salud Pública de México*, 55(2), 206-213.
- Noriega González, L. A., Preciado Ortiz, R., Andrio Enríquez, E., Terrón Ibarra, A., & Covarrubias Prieto, J. (2011). Fenología, crecimiento y sincronía floral de los progenitores del híbrido de maíz QPM H-374C. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(4).
- Ortega-Marín, B. A., & González-Rosas, A. (2023). La seguridad alimentaria y la sostenibilidad medio ambiental de México. Una revisión. *INNOVARE. Revista de Ciencia y Tecnología*, 12(2).
- Pérez Camarillo, J. P., Hernández Casillas, J. M., Martínez Hernández, L., Franco Ramírez, S., & Martínez Ruiz, E. (2009). *Conocimiento de la diversidad y distribución actual de maíz nativo y sus parientes silvestres de México*. Hidalgo: CONABIO-INIFAP.

- Pérez-Nieto, J., Volke-Heller, V., Martínez-Menes, M., & Estrella-Chullin, N. (1998). Erosión, productividad y rentabilidad de dos suelos del estado de Oaxaca. *Agrociencia*, 113-118.
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., . . . Blair, R. (1995). Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits. *Science*, 267, 1117-1123.
- Pinstrup-Andersen, P., & Babinard, J. (2001). Globalization and Human Nutrition: Opportunities and risks for the poor in developing countries. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*.
- Ray, D. K., Gerber, J. S., MacDonald, G. K., & West, P. C. (2015). Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nature communications*. doi: 10.1038
- Rojas Rangel, T. (2009). La crisis del sector rural y el coste migratorio en México. *Iberóforum. Revista de Ciencias Sociales de la Universidad Iberoamericana*, IV(8), 40-81.
- SADER. (2023). *Programas de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural*. Obtenido de Programa Producción para el Bienestar: <https://www.gob.mx/agricultura/acciones-y-programas/programa-produccion-para-el-bienestar-324223>
- Santos Telles, T., Guimaraes, M., & Falci Dechen, S. C. (2011). The costos of soil erosion. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. doi:DOI: 10.1590/S0100-06832011000200001
- SEMARNAT. (2002). *Evaluación de la pérdida de suelos por erosión hídrica y eólica en la república mexicana. Escala 1:1 000 000*. México: SEMARNAT.
- SEMARNAT. (2012). *La degradación de suelos en México*. Obtenido de Informe de la situación del medio ambiente en México: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/03_suelos/cap3_2.html
- SEMARNAT. (2018). *Informe de la situación del medio ambiente en México*. Ciudad de México: SEMARNAT.
- Sequeira, N., & Vázquez, P. (2022). Impacto de la erosión hídrica sobre la rentabilidad de los productores agrícolas en el partido de Tres Arroyos, Región Pampeana Austral, Argentina. *Revista Geográfica de América Central*.
- Shiferaw, B., & Bantilan, C. (2004). Agriculture, rural poverty and natural resource management in less favored environments: Revisiting challenges and conceptual issues. *Food, Agriculture & Environment* , 328-339.
- Shiferaw, B., & Bantilan, C. (2004). Agriculture, rural poverty and natural resource management in less favored environments: Revisiting challenges and conceptual issues. *Food, Agriculture & Environment*, 328-339.
- SIAP. (2016). *SIAP*. Obtenido de Avance de siembras y cosechas : http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do
- SIAP. (2021). *SIAP*. Obtenido de Avance de Siembras y Cosechas. Resumen por estado.
- SIAP. (2022). *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*. Obtenido de Avance de Siembras y Cosechas. Resumen por estado:

http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do

- Silva Arroyave, S. M., & Correa Restrepo, F. (2010). Valoración económica del suelo y gestión ambiental: Aplicación en empresas floricultoras colombianas. *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas de la Universidad Militar de Granada*, 247-267.
- Tegtmeier, E. M., & Duffy, M. D. (2004). External costs of agricultural production in the United States. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2(1), 1-20.
- Torres, F., & Rojas, A. (2020). Seguridad alimentaria y sus desequilibrios regionales en México. *Revista Latinoamericana de Economía*, 57-83. doi:10.22201/iiec.20078951e.2020.201.69521
- Urquía Fernández, N. (2014). La seguridad alimentaria en México. *Salud Pública de México*, 56(1), 92-98.
- Valdez Zertuche, J., Badii, M., Guillen, A., & Acuña Zepeda, M. (2015). Causas e Impactos Socio-Económico y Ambientales de la Erosión. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 76-87.
- Warrington, I. J., & Kanemasu, E. T. (1983). Corn growth response to temperature and photoperiod. *Agron J*, 762-766.
- Wilson, E. (1994). *La agenda inconclusa-Hambruna y pobreza en el siglo 21*. Madrid: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria.
- Zar, J. (1999). *Biostatistical Analysis* (Vol. 4th Ed). New Jersey: Prentice Hall.