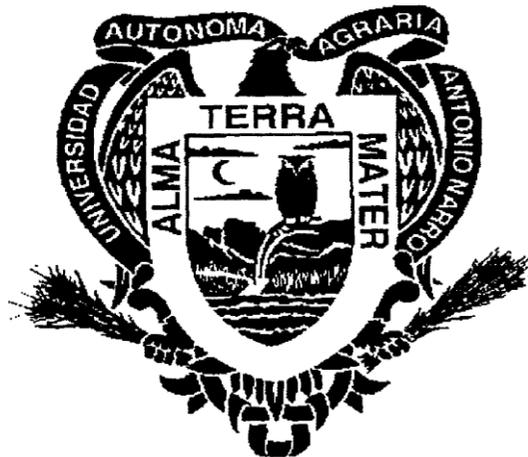


**UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”**

DIVISION DE AGRONOMIA



**ESCURRIMIENTO, INFILTRABILIDAD Y PÉRDIDA DE
SUELO EN LA ZONA REFORESTADA DE LA SIERRA
ZAPALINAMÉ AL SURESTE DE COAHUILA, MÉXICO.**

por

JULIO CÉSAR RIOS SAUCEDO

TESIS PROFESIONAL

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO FORESTAL

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MEXICO

MAYO DE 2003



**BIBLIOTECA
EGIDIO G. REBONA
BANCO DE TESIS
U.A.A.A.N.**

13622

UNIVERSIDAD AUTONOMO AGRARIA

" ANTONIO NARRO "

DIVISION DE AGRONOMIA

ESCURRIMIENTO, INFILTRABILIDAD Y PÉRDIDA DE SUELO EN LA ZONA
REFORESTADA DE LA SIERRA ZAPALINAMÉ AL SURESTE DE COAHUILA,
MÉXICO.

TESIS PROFESIONAL

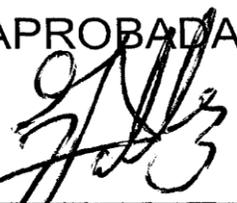
POR

JULIO CESAR RIOS SAUCEDO

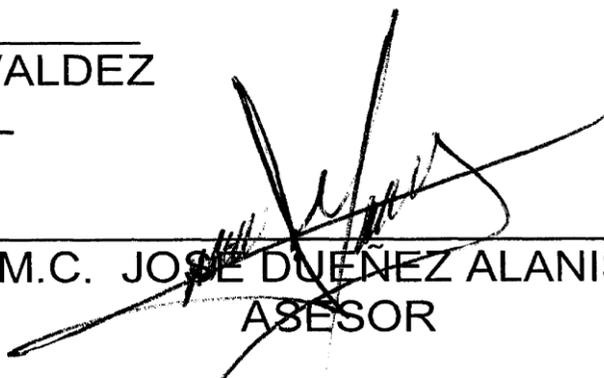
QUE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO FORESTAL

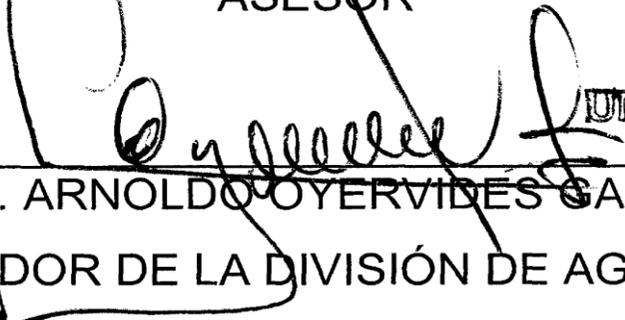
APROBADA:


M.C. MELCHOR GARCIA VALDEZ
ASESOR PRINCIPAL


DR. JOSÉ DE JESÚS NAVAR CHÁIDEZ
ASESOR


M.C. JOSÉ DUÉNEZ ALANIS
ASESOR


ING. HERIBERTO MARTÍNEZ LARA
ASESOR

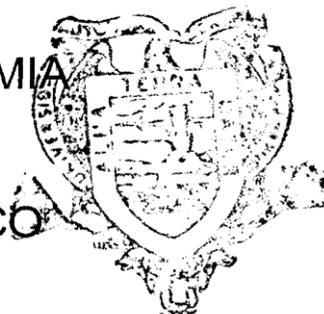

M.C. ARNOLDO OYERVIDES GARCIA

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE AGRONOMIA

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MEXICO

MAYO DE 2003



BIBLIOTECA
EGIDIO G. REBONATO
BANCO DE TESIS
U.A.A.A.N.

División de Agronomía
Coordinación.

13622

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"

DIVISION DE AGRONOMIA

**ESCURRIMIENTO, INFILTRABILIDAD Y PÉRDIDA DE SUELO EN LA ZONA
REFORESTADA DE LA SIERRA ZAPALINAMÉ AL SURESTE DE COAHUILA,
MÉXICO.**

POR

JULIO CESAR RIOS SAUCEDO

TESIS PROFESIONAL

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO FORESTAL

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MEXICO.

MAYO DE 2003

DEDICATORIA

A mis padres Yolanda Saucedo y Víctor H. Ríos sin los cuales no hubiese podido lograr el objetivo de mi formación como un profesional, a los cuales les estaré eternamente agradecidos.

A mis hermanos Concepción Guadalupe, Norma Adriana y Víctor Hugo por su apoyo brindado en mi formación.

A mi esposa Elia Margarita por su amor, comprensión y su apoyo moral incondicional, sin lo cual no hubiera sido posible realizar esta ambición.

A mi hija Andrea Elizabet por ser mi orgullo y mi alegría, la cual me alienta a seguir superándome.

A mis padrinos
Elvira y Adalberto por su apoyo incondicional

En especial a la familia Hernández, Esther (†), Miguel (†), Lourdes, Octaviano, Miguel A., Víctor, Adalberto, Alfredo,

A mis Amigos Jerónimo navarro, Ossiell de la cruz, Francisco vargas, Roberto Rivas, Edgar Puentes, Elpidio Páez, Jesús Contreras, Santos, Alejandro Zarate, Agustín Venegas, Tania, Mireia, Beatriz, Tamara, José, Arturo, Edgar, Cesar, Ana, Pilar y Chuy.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

A la Facultad de Ciencias Forestales de la UANL que me abrió sus puertas para la obtención de información para dicho trabajo.

Al Ing. MC José Dueñez Alanis por su disposición, paciencia, consejos y apoyo incondicional en la realización y culminación de la presente tesis y el aliento para seguir adelante y sobretodo por su amistad brindada durante el tiempo de conocerlo, con quien comparto el merito del trabajo.

Al Dr. José de Jesús Návar Cháidez por sus atinados comentarios para el mejoramiento de texto, como también por su valiosa participación y colaboración en el aspecto estadístico y culminación de la presente tesis.

Al Ing. MC Melchor García Valdez por su orientación, formación, y conocimientos otorgados durante mi formación profesional.

Al Ing. Heriberto Martínez Lara por haber formado parte de mi comité de tesis.

Al Ing. Omar Saucedo Martínez por su participación en la elaboración de el presente trabajo.

A la Biol. Silvia Guerrero por su colaboración y realización de los análisis de laboratorio.

Agradezco al Dr. Alejandro Zarate Lupercio y al MC Andrés Najera Díaz por su orientación y amistad a lo largo de mi carrera profesional.

A la academia Departamental de la especialidad forestal por su benemérita labor en la impartición de sus conocimientos.

A mis compañeros y amigos de la especialidad, con quienes comparto el merito del presente trabajo.

Finalmente, a todas aquellas personas que de una u otra forma me han permitido conocerlos a lo largo de mi estancia en la Universidad y en la ciudad de Saltillo.

INDICE DE CONTENIDO

PAGINA

| | |
|---|----|
| DEDICATORIA..... | |
| AGRADECIMIENTO..... | |
| INDICE DE FIGURAS..... | |
| INDICE DE CUADROS..... | |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| Objetivo general..... | 2 |
| Objetivos específicos..... | 3 |
| Hipótesis..... | 3 |
| Justificación..... | 3 |
| REVISIÓN DE LITERATURA..... | 5 |
| Definiciones de infiltración..... | 5 |
| Procesos de infiltración..... | 5 |
| Factores que afectan la infiltrabilidad..... | 7 |
| Esguerrimiento superficial..... | 9 |
| Definiciones..... | 10 |
| Método empírico..... | 11 |
| Método directo..... | 12 |
| Factores que afectan el esguerrimiento superficial..... | 12 |
| Algunas consideraciones de la problemática de los procesos hidrológicos.... | 14 |
| Perdida de suelo..... | 15 |
| Definiciones..... | 16 |
| Factores que afectan la pérdida de suelo..... | 17 |
| Algunas consideraciones de la problemática de los procesos hidrológicos. | 18 |
| Uso de la simulación de lluvia en estudios de procesos hidrológicos..... | 20 |
| Estudios relacionados..... | 21 |
| MATERIALES Y METODOS | |
| Descripción general del área..... | 26 |
| Clima..... | 26 |
| Suelos..... | 27 |
| Vegetación..... | 28 |

| | |
|--|-----------|
| Descripción de los sitios..... | 29 |
| Metodología..... | 31 |
| Simulación..... | 32 |
| Estimación de la tasa de escurrimiento..... | 32 |
| Estimación de la infiltrabilidad..... | 33 |
| Estimación de la concentración de sedimentos..... | 33 |
| Estimación de las características del suelo..... | 34 |
| Estimación de las características de vegetación..... | 35 |
| | |
| Modelos y análisis estadístico..... | 36 |
| Modelo de infiltrabilidad..... | 36 |
| Modelo de escurrimiento..... | 37 |
| Modelo de concentraron de sedimentos..... | 37 |
| Modelo de erosión superficial..... | 38 |
| Modelos de regresión..... | 38 |
| | |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | |
| Escurrimiento superficial..... | 39 |
| Infiltrabilidad..... | 48 |
| Concentración de sedimentos..... | 54 |
| Erosión superficial..... | 63 |
| | |
| CONCLUSIÓN..... | 72 |
| | |
| RESUMEN..... | 73 |
| | |
| LITERATURA CITADA..... | 75 |

INDICE DE CUADROS

| CUADRO | | PAGINA |
|--------|--|--------|
| 1 | Especies principales existentes en la zona de reforestación de Zapalinamé..... | 29 |
| 2 | Valores promedio de la tasa de escurrimiento superficial (cmhr^{-1}) estimadas a intervalos de tiempo en las diferentes etapas reforestadas con <i>Pinus halepensis</i> Mill., en la Sierra Zapalinamé..... | 40 |
| 3 | Parámetros de la ecuación de escurrimiento superficial (cmhr^{-1}) de cada una de las etapas de plantación con <i>Pinus halepensis</i> Mill. En la Sierra Zapalinamé..... | 42 |
| 4 | Parámetros de la ecuación para escurrimiento superficial (cmhr^{-1}) de cada una de cada una de las variables en las etapas de plantación con <i>Pinus halepensis</i> Mill. En la Sierra Zapalinamé..... | 45 |
| 5 | Valores promedio ajustados de la infiltrabilidad (cmhr^{-1}) estimadas a intervalos de tiempo en las diferentes etapas reforestadas con <i>Pinus halepensis</i> Mill. en la Sierra Zapalinamé..... | 49 |
| 6 | Parámetros de infiltrabilidad (cmhr^{-1}) de cada una de las etapas de plantación con <i>Pinus halepensis</i> Mill. en la Sierra Zapalinamé..... | 51 |
| 7 | Parámetros de la ecuación para infiltrabilidad (cmhr^{-1}) de las variables en las etapas de plantación con <i>Pinus halepensis</i> Mill. en la Sierra Zapalinamé..... | 53 |
| 8 | Valores promedio de la concentración de sedimentos (gr/l^1) estimada a intervalos de tiempo en las diferentes etapas reforestadas con <i>Pinus halepensis</i> Mill. en la Sierra Zapalinamé.... | 57 |
| 9 | Parámetros de concentración de sedimentos (gr/l^1) de cada una de las etapas de plantación con <i>Pinus halepensis</i> Mill. en la Sierra Zapalinamé..... | 60 |
| 10 | Parámetros de la ecuación para concentración de sedimentos (gr/l^1) de las variables en las etapas de plantación con <i>Pinus halepensis</i> Mill. en la Sierra Zapalinamé..... | 62 |

| | | |
|----|---|----|
| 11 | Valores promedio ajustados de la erosión superficial (kg ha^{-1}) estimada a intervalos de tiempo en las diferentes etapas reforestadas con <i>Pinus halepensis</i> Mill. en la Sierra Zapalinamé..... | 64 |
| 12 | Parámetros de la erosión superficial (kg ha^{-1}) de cada una de las etapas de plantación de estudio con <i>Pinus halepensis</i> Mill. en la Sierra Zapalinamé..... | 67 |
| 13 | Valores promedio de las características del suelo en los sitios de estudio en la reforestación Zapalinamé..... | 69 |
| 14 | Valores promedio de las características de la cubierta vegetal en las diferentes etapas reforestadas con <i>Pinus halepensis</i> Mill. en la Sierra Zapalinamé..... | 70 |
| 15 | Valores promedio de las características de la cubierta vegetal en las diferentes etapas reforestadas con <i>Pinus halepensis</i> Mill. en la Sierra Zapalinamé..... | 71 |

INDICE DE FIGURAS

| FIGURA | | PAGINA |
|--------|--|--------|
| 1 | Valores promedio de las tasas de escurrimiento (cmhr ⁻¹) de las diferentes plantaciones con <i>Pinus halepensis</i> Mill. En la Sierra Zapalinamé..... | 41 |
| 2 | Parámetros de las ecuaciones del escurrimiento superficial (cmhr ⁻¹) de cada una de las etapas de plantación con <i>Pinus halepensis</i> Mill. En la Sierra Zapalinamé..... | 42 |
| 3 | Parámetros de la ecuación para escurrimiento superficial (cmhr ⁻¹) de las variables en las etapas de plantación con <i>Pinus halepensis</i> Mill. En la Sierra Zapalinamé..... | 46 |
| 4 | Parámetros de la ecuación para escurrimiento superficial (cmhr ⁻¹) de las variables en las etapas de plantación con <i>Pinus halepensis</i> Mill. En la Sierra Zapalinamé..... | 47 |
| 5 | Modelos de Kostiakov modificado ajustados a la infiltrabilidad (cmhr ⁻¹) de las diferentes plantaciones con <i>Pinus halepensis</i> Mill. En la Sierra Zapalinamé.... | 50 |
| 6 | Parámetros de la ecuación de la infiltrabilidad (cmhr ⁻¹) de cada una de las etapas de plantación con <i>Pinus halepensis</i> Mill. En la Sierra Zapalinamé..... | 52 |
| 7 | Parámetros de la ecuación para infiltrabilidad (cmhr ⁻¹) de cada una de las etapas de plantación con <i>Pinus halepensis</i> Mill. En la Sierra Zapalinamé..... | 55 |
| 8 | Parámetros de la ecuación para infiltrabilidad (cmhr ⁻¹) de cada una de las etapas de plantación con <i>Pinus halepensis</i> Mill. En la Sierra Zapalinamé..... | 56 |

| | | |
|----|---|----|
| 9 | Valores promedio de las tasas de concentración de sedimentos (gr/l^1) de las diferentes plantaciones con <i>Pinus halepensis</i> Mill. En la Sierra Zapalinamé..... | 58 |
| 10 | Parámetros de la ecuación de concentración de sedimentos (gr/l^1) de cada una de las etapas de plantación con <i>Pinus halepensis</i> Mill. En la Sierra Zapalinamé..... | 61 |
| 11 | Parámetros de la ecuación de concentración de sedimentos (gr/l^1) de cada una de las etapas de plantación con <i>Pinus halepensis</i> Mill. En la Sierra Zapalinamé..... | 62 |
| 12 | Valores promedio ajustados de la erosión superficial (kg/ha^{-1}) de las diferentes plantaciones con <i>Pinus halepensis</i> Mill. en la Sierra Zapalinamé..... | 65 |
| 13 | Parámetros de la ecuación de la erosión superficial (kg/ha^{-1}) de cada una de las etapas de plantación con <i>Pinus halepensis</i> Mill. En la Sierra Zapalinamé.... | 68 |

INTRODUCCIÓN

El incremento en la desertificación causada por el aprovechamiento excesivo de los recursos naturales se ha transformado en un grave problema. En las regiones áridas del norte de México la tala inmoderada, los desmontes, los incendios, el sobrepastoreo y las sequías frecuentes han causado que la vegetación y suelo se han afectados considerablemente, provocado la reducción de la infiltración, un incremento en los escurrimientos superficiales y la pérdida suelo.

La erosión es un proceso geológico que se ha acelerado por la actividad antropogénica. Loredo (1994) menciona que en México esto ocurrió después de la llegada de los españoles. Los colonizadores introdujeron cambios en la planificación de los esquemas de producción y utilización de los recursos naturales. Los ecosistemas más afectados han sido los bosques de las zonas áridas y semiáridas al perder la cubierta vegetal y el suelo sin vegetación. La cubierta forestal tanto herbácea, arbustiva, arbórea y el mantillo orgánico tienen gran importancia sobre el suelo, al amortiguar el impacto de las gotas de lluvia, reducir el flujo superficial y el grado de erosión, así como determinar la cantidad de agua infiltrada y la pérdida de suelo en un sitio.

Al presentar un sitio una buena estabilidad y estructura en su suelo y vegetación, una buena protección por hojarasca y cubierta vegetal las tasas de infiltración podrán mejorarse, el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo será mínima, con lo cual se elevarán también las oportunidades para recargar el agua del suelo, y con ello incrementa la humedad para la vegetación y la recarga de los mantos acuíferos.

Mediante las reforestaciones se ha tratado de proporcionar desarrollo y recuperar áreas degradadas, ya que dicha actividad es considerada como una solución para dar respuesta a problemas presentados con la pérdida de cobertura vegetal por diversas causas, entre las cuales se encuentran la alta demanda de satisfactores de la sociedad en el país. Además, la reforestación es considerada como un medio de manipulación de la cubierta vegetal y el suelo que propicia cambios en varios procesos hidrológicos en un área.

Ante la falta de vegetación, que influenciaban las condiciones hidrológicas y la necesaria restauración forestal en la Sierra de Zapalinamé, la cual en épocas pasadas estuvo en su totalidad cubierta por bosques de *Pinus cembroides* Zucc. En 1960 se implementó un plan de reforestación para el sitio, debido al abatimiento de mantos acuíferos, fuente de abastecimiento de agua para la ciudad de Saltillo, Coahuila y la pérdida de suelo y avenidas de escurrimientos en el área, donde drenaba constantemente el agua superficial, así como la producción de otros recursos naturales y estéticos. La reforestación planteaba entre otros objetivos 1) detener la erosión del suelo que avanzaba rápidamente y 2) recargar los mantos acuíferos que abastecen a la ciudad de Saltillo, a través del incremento de la infiltración del agua en el suelo.

Objetivo General

Evaluar el efecto de las etapas de reforestación en el proceso de escurrimiento superficial, infiltrabilidad y la pérdida de suelo en la Sierra Zapalinamé, Saltillo, Coahuila.

Los parámetros físico – químicos del suelo y las características de la vegetación no controlan los procesos de escurrimiento superficial, infiltrabilidad, concentración de sedimentos y la erosión superficial

Objetivos Específicos

Evaluar el efecto sobre el escurrimiento superficial, la infiltrabilidad, la concentración de sedimentos y la erosión superficial de cinco etapas de reforestación en la Sierra Zapalinamé.

Determinar algunas de las características de suelo y vegetación que se relacionan con el escurrimiento superficial, la infiltrabilidad, la concentración de sedimentos y la erosión superficial en la reforestación de la Sierra Zapalinamé.

Hipótesis

A mayor edad de las plantaciones en la Sierra Zapalinamé se incrementa la infiltrabilidad y se reduce el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo. Esto se debe al mejoramiento de las propiedades físico – químicas del suelo. Y al aumento en la cobertura vegetal sobre el sistema.

Justificación

El presente trabajo generara información básica que contribuirá a una mejor planeación de las plantaciones en un área en base a varios, para su conservación, la producción de agua o valor estético, en esta región como en otras similares. El conocimiento básico de los procesos hidrológicos en estudio en las distintas plantaciones darán una pauta a seguir y definir la importancia que tienen tanto en la recuperación de los suelos y la cubierta vegetal por especies utilizadas para llevar a cabo las reforestaciones, como el transcurso

del tiempo que permite el propio desarrollo de las plantas y la influencia sobre la hidrología y la erosión del suelo de un área.

El conocimiento de los procesos hidrológicos en un área, en particular de la zona de reforestación en la Sierra Zapalinamé, es uno de los pasos para la investigación de un sistema y del potencial de las plantaciones y de las que en un futuro se realizarán a cabo en la región o en el país. En diversos estudios se menciona los efectos benéficos, sin llegar a mencionar su magnitud o ser evaluados, por ello este trabajo proporcionará bases de la importancia de una reforestación para inferir sobre los procesos de infiltración y pérdida de suelo.

REVISION DE LITERATURA

Infiltración

La infiltración fue reconocida en el ciclo hidrológico por primera vez por Horton en 1933, quien la define como la entrada de agua al suelo, y debe ser considerado como un fenómeno superficial (Davis y Deweist, 1974).

En hidrología aplicada, el término infiltración se utiliza para denotar el proceso por medio del cual el agua pasa de la atmósfera al suelo. Lee (1980) define a la infiltración como el proceso por medio del cual el agua penetra al suelo; Dunne y Leopold (1978) hacen mención que la infiltración envuelve 3 procesos: entrada a través de la superficie, almacén y transmisión dentro del suelo.

El movimiento del agua dentro de los suelos controla parcialmente a la larga el proceso de infiltración y el coeficiente de flujo subterráneo hacia arroyos y ríos (Kramer, 1974). Cuando el suelo está seco y una gota de agua de lluvia toca la superficie del terreno, las fuerzas de presión y gravedad de esta la atraen y hacen que se absorba rápidamente; en este fenómeno, el propio peso de una gota de agua tiene una importancia totalmente secundaria, pero cuando la superficie del suelo se humedece, el proceso de presión va perdiendo intensidad y la infiltración tiene lugar, debido a la atracción gravitatoria (movimiento centrípeta de la tierra). El subsuelo en muchos puntos es menos permeable que los horizontes superiores, en momentos de abundante infiltración se retarda la infiltración descendente y se forma en el mismo suelo

una zona de saturación temporal en los horizontes superiores (Benítez, 1972).

Las unidades de infiltración son expresadas en lamina por unidad de tiempo, al mismo tiempo que la intensidad de lluvia (SEP, 1978). Hillel (1981; 1982) la define de la misma manera, y al mismo tiempo define la infiltrabilidad como el flujo de agua que el perfil de la tierra puede absorber a través de la superficie cuando tiene contacto el agua a presión atmosférica y se encuentra disponible sobre la superficie del suelo.

Rodríguez (1981) menciona que desde el inicio de una lluvia, el agua es interceptada por la cubierta vegetal, posteriormente se infiltra, saturando el suelo superficial y el excedente del agua infiltrada se agrega a la percolación de las corrientes subterráneas; cuando se satisface la infiltrabilidad del suelo, el agua se acumula y en ocasiones escurriendo por el efecto de la pendiente.

La cantidad de agua que se precipita durante la lluvia, experimenta una considerable disminución aproximadamente del 50 %, de la cual una parte se evapora durante la lluvia, otra es interceptada por la vegetación el resto se percola al subsuelo o se pierde por escurrimiento (Wagner y Lenz, 1989).

Así, al inicio de un evento de precipitación en un suelo seco la entrada de agua es muy alto durante un tiempo, a medida que el suelo se humedece la infiltración disminuye rápidamente hasta alcanzar un punto de equilibrio constante (FAO, 1967). La disminución de la infiltración con el tiempo ocurre en cualquier momento. La obturación de las grietas y porosidad de la superficie del suelo, debido al choque de las gotas de lluvia acelera la

disminución y del valor de equilibrio o infiltrabilidad constante y la prevención de esta obturación mediante la cobertura de material orgánico mantiene en valores elevados la infiltrabilidad y, reduce el escurrimiento y la erosión hídrica.

Dunne y Leopold (1978) mencionan que en la mayoría de las regiones húmedas la infiltrabilidad es alta porque la vegetación protege al suelo de la energía cinética y dispersión del suelo y además porque el contenido de humus y la actividad de microflora crean un suelo de estructura abierta y baja densidad aparente.

Factores que afectan la Infiltrabilidad

Los factores que afectan la infiltración han sido ampliamente discutidos desde hace varias décadas, Moore *et al.* (1979) agrupan los factores que afectan la infiltrabilidad en seis categorías, siendo estos: la cobertura del suelo, características físicas del suelo, características químicas del suelo, factores bióticos de vegetación, factores climáticos y fisiografía del lugar de interés.

Por otro lado, Wisler (1959) y Kramer (1974) coinciden en que los principales factores que afectan la infiltración del agua al suelo son el contenido hídrico inicial, profundidad de detención de la superficie y espesor de la capa saturada, permeabilidad superficial, compactación del suelo por las gotas de lluvia, compactación del suelo por el hombre y los animales, características internas del suelo, lavado del material del suelo, grado de hinchazón de los coloides del suelo, macroestructura del suelo, cubierta vegetativa, efectos de las heladas, el aire atrapado

en el suelo, cambios anuales y estacionales, contenido orgánico, duración de la lluvia, temperatura del suelo.

Los suelos forestales cubiertas de coníferas captan y almacenan gran cantidad de agua, siendo influenciado por el clima, el subsuelo poroso y pedregoso, la configuración topográfica de la región, el suelo o mantillo y la vegetación. Así mismo, la composición de la capa vegetal es de mucha importancia, pues de ella depende que la lluvia se infiltre rápida o lentamente en el subsuelo y, que llegue a los almacenes subterráneos u ocasione erosión o inundaciones (Wagner y Lenz, 1989).

Los factores más importantes para considerar si un área contribuye a la infiltrabilidad del suelo incluye la posición física con respecto al cauce, las propiedades del suelo y las características de la lluvia (Branson *et al.*, 1981). Además, las partes altas de las elevaciones son las áreas que contribuyen a la recarga de los mantos freáticos y las áreas cercanas a los arroyos en los valles son las que normalmente contribuyen al escurrimiento superficial y las áreas intermedias, conocidas como zonas dinámicas, pueden contribuir al cauce por escurrimientos superficiales o pueden recargar las áreas de humedad, lo cual depende del antecedente de humedad y de las mismas propiedades del suelo.

La mejor infiltración se obtiene con los suelos forestales caracterizados por una buena cubierta de mantillo, una baja densidad de masa, macroporos hecho por la microfauna y las raíces (Supr. y Barnes, 1982), esta puede recorrer largos o cortos trayectos en el subsuelo hasta que se emerge en algún manantial o cauce (Wagner y Lenz, 1989). Asimismo, los bosques de pinos, oyameles y encinos y las laderas cubiertas de zacates pueden

retener hasta el 50, 85 y 5 por ciento de las precipitaciones, respectivamente.

Wood *et al.* (1987) evaluaron los factores que influyen los grados de infiltración y erosión superficial en cuatro cuencas en Nuevo México, bajo varios suelos y prácticas de manejo. Un análisis de regresión múltiple fue usado para determinar los factores más importantes que afectan la infiltración y la erosión superficial. Encontrando que los factores más importantes son la textura del suelo, la materia orgánica del suelo, la densidad del suelo, la cobertura vegetal, producción de biomasa. De todas las variables estudiadas, la cubierta total del suelo fue considerada como la más importante variable que afecta la infiltración y la pérdida de suelo. ↘

La compactación natural dificulta la penetración del agua y, por lo tanto reduce la infiltración (Custodio *et al.*, 1976). Esto es, los agregados de partículas son divididos por el agua cuando llueve sobre áreas desnudas, estas son arrastradas llevadas hacia el interior, bloquear poros y grietas impidiendo o retardando el agua infiltrada. Asimismo, un suelo con excelente drenaje, puede tener una capacidad de infiltración baja debido a este sellado de la superficie y capas superiores.

Escurrimiento Superficial

El escurrimiento es la parte de la precipitación que fluye por gravedad sobre la superficie del suelo, por el interior del mismo o hasta llegar a una corriente de agua o al manto freático (INEGI, 1990; CONAGUA, 1994). El escurrimiento puede expresarse de acuerdo a la ecuación (Satterlund y Adams, 1992):

$$Q = P_{pt} + R_s + R_i + R_g$$

Donde:

Q = Escurrimiento total
subsuperficial

R_s = Escurrimiento superficial

R_i = Escurrimiento

R_g = Escurrimiento subterráneo

P_{pt} = Precipitación sobre el cauce

El escurrimiento superficial es el agua que no entra al suelo y fluye sobre el terreno hasta llegar a un cauce o se almacena en alguna depresión del suelo, natural o artificial, se presenta cuando la intensidad de lluvia es mayor a la tasa de infiltración o el suelo tiene alto contenido de humedad (Pritchett, 1986; Medina y Gutiérrez, 1990). Cuando no existe cobertura vegetal en un área de drenaje, las gotas de la precipitación se colisionan contra el suelo, desprendiendo los agregados fácilmente, sellando la superficie con las partículas finas del suelo, de acuerdo a intensidad de la precipitación, y el agua no penetra al suelo (Gutiérrez et al., 1990b). Mientras, el agua acumulada sobre la superficie del suelo llena las depresiones hasta que empieza a fluir por gravedad en el sentido de la pendiente. Si se toma en cuenta que las depresiones existentes en una cuenca son numerosas se puede observar que la distancia que tiene que recorrer el agua sobre la superficie es relativamente corta. En las lluvias de poca intensidad, el escurrimiento superficial se presenta únicamente en las áreas impermeables, exceptuando las zonas urbanas donde la mayor parte de la superficie es impermeable, el porcentaje de áreas impermeables en una cuenca es muy pequeño (Dueñez, 1993).

El escurrimiento subsuperficial es la parte de la lluvia que penetra el perfil del suelo y se mueve lateralmente por los horizontes superiores del suelo hasta llegar a un cauce o aflorar en un manantial, su movimiento es más lento que el flujo superficial.

Para determinar el exceso de agua que se genera a partir de un evento de lluvia, es necesario conocer algunos parámetros característicos del área y de la lluvia (Figueroa *et al.*, 1993): a) características generales de la cuenca (área, forma, pendiente, vegetación, etc.), b) precipitación, c) distribución espacial y temporal de la lluvia. La evaluación de los escurrimientos superficiales puede realizarse por métodos empíricos y directos (SARH, 1982):

I. Métodos Empíricos.

a) Cálculo del escurrimiento medio. Este se emplea en cuencas pequeñas o áreas de drenaje reducidas.

b) Cálculo de escurrimiento máximo (método racional). Se usa cuando existen datos pluviométricos de una estación dentro o cerca del área en estudio.

c) Método racional modificado. Se emplea cuando no existen datos pluviométricos de una estación dentro o cerca del área en estudio, considera la lluvia máxima en 24 hr.

d) Hidrogramas sintéticos

e) Hidrogramas unitarios

f) Método simplificado de huellas máximas. Este método no requiere de datos pluviométricos y se recomienda en cárcavas donde se observe claramente las huellas dejadas por los escurrimientos máximos.

II. Método Directo

Consiste en el confinamiento de una pequeña superficie donde es posible manejar y calificar los escurrimientos generados.

Factores que Afectan el Escurrimiento.

La combinación de poca cantidad de gramíneas y la escasa presencia de hojarasca, una alta pedregosidad y un alto contenido de humedad reducen la entrada del agua al suelo, provocando con ello los escurrimientos superficiales (Luna, 1989). Así mismo, apunta que los suelos someros tienen menos desarrollo de raíces, lo cual hace que exista menor infiltración y un mayor escurrimiento superficial.

Los factores del escurrimiento se pueden clasificar en dos grupos: en el primero los factores climáticos, incluyendo el efecto de la lluvia, de la nieve y de la evapotranspiración, los que tienen enorme importancia, debido a que son afectados por los cambios estacionales ocasionados por el clima dominante. En el segundo grupo se incluyen los factores físicos - bióticos (Linsley, 1949; Chow, 1964; Rodríguez, 1981).

En esta última, se agrupan las características de la cuenca que comprenden características geométricas y físicas. En otra clase, se incluyen las características del cauce principal y de drenaje, como son las propiedades hidráulicas, capacidad de regulación o almacenamiento y rugosidad del cauce.

Además, de los factores fisiográficos se menciona dos tipos de características, las cuales son: las básicas y las físicas, las cuales se desglosan a continuación:

- Características básicas o factores geométricos: tamaño, forma, pendiente, orientación, elevación, densidad de cauces.
- Factores físicos: el uso del suelo, tipo de suelo, condición de infiltración de la superficie, condiciones geológicas como permeabilidad y capacidad de formaciones de aguas molidas, condiciones topográficas como la presencia de lagos y pantanos, el tipo y red de drenaje, la magnitud de drenaje indirecto y el drenaje artificial.

Otro factor a considerar es la topografía. Las características del relieve del área y del cauce, como es la longitud y el grado de la pendiente, son factores importantes asociados al escurrimiento superficial. Uno de los primeros estudios sobre estos factores fue realizado por Zingg (1940) quien resumió información de diversas parcelas evaluadas bajo condiciones de lluvia artificial y natural. La longitud de la pendiente es la distancia del punto de origen del escurrimiento superficial al punto donde cambia el grado de la pendiente; la acumulación del volumen escurrido a lo largo de la pendiente incrementa la capacidad de desprendimiento y transporte del flujo superficial (Wischmeier y Smith, 1978).

En las tierras forestales el grado y longitud de la pendiente de los cauces afecta considerablemente la velocidad del escurrimiento que en ellos se realiza; la pérdida de suelo en las cárcavas o canales, debidas al movimiento de masas de suelo, es una de las formas dominantes de erosión en los bosques bajo aprovechamiento (Ursic y Dendy, 1965). Estos factores ocasionan comportamiento diferente del escurrimiento en la mayoría de las cuencas, perceptibles solo al comparar los escurrimientos con una cuenca de menor dimensión desde el punto de vista hidrológico, lo cual ayuda a diferenciar las cuencas grandes de las pequeñas, pero considerando el tamaño no como una

función de la extensión territorial, sino en el efecto de ciertos factores climáticos o fisiográficos dominantes.

Para la reforestación Zapalinamé, Loredó (1994) hace mención que los factores de suelo y vegetación más relacionados con el escurrimiento son el suelo desnudo, la cobertura de mantillo, la profundidad de suelo y la estabilidad de agregados.

Algunas Consideraciones de la Problemática de los Procesos Hidrológicos.

El flujo de agua o escurrimiento superficial rara vez se presenta en forma de una lámina de profundidad uniforme. Más comúnmente es una masa o flujo de agua de curvas entrelazadas por canales no pronunciadas provocando pérdidas de suelo y nutrimentos (Loredó, 1994).

Martínez y Fernández (1984) evaluaron la degradación específica promedio del suelo que se presenta en las diferentes cuencas hidrológicas del país y observaron que la máxima degradación (aquella pérdida de suelo mayor de $5 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) se presenta en cuencas localizadas en un clima de trópico seco. Además, se estimó que en promedio el 23 por ciento de lo que llueve se convierte en escurrimiento y que las estimaciones de pérdidas de suelo en forma de sedimentos en suspensión, aforado en $1'692,328.9 \text{ km}^2$ (el cual representa el 95 por ciento del territorio nacional) y reporta pérdidas del orden de $364.9 \text{ millones de ton año}^{-1}$, de las cuales el 69 por ciento se descargó al mar y el otro 31 por ciento se queda en el interior de los continentes, depositándose en los almacenamientos de agua, disminuyendo así la disponibilidad de la misma cada año.

Jiménez (1971) menciona que en el país existen condiciones topográficas, climáticas y de perturbación de los recursos suelo y vegetación que provocan un acarreo aproximado de 130,106 de m³ de sedimentos anuales.

Evans (1980) sustenta que el proceso implica el desprendimiento y la dispersión de las partículas del suelo por impacto de las gotas de lluvia, compactación superficial del suelo y formación de una costra superficial que reduce la infiltración y finalmente la formación de charcos y el escurrimiento.

Wendt *et al.* (1986) estudiaron la variabilidad del escurrimiento y pérdida de suelo de 40 parcelas experimentales, examinando 25 eventos naturales de lluvia ocurridas durante un periodo de 155 días. Las diferencias en cantidad de escurrimiento y pérdida de suelo en las parcelas, varía con cada evento. La gran variabilidad inexplicable muestra que varias respuestas de los tratamientos son necesarias para estimar la cantidad de escurrimiento y pérdida de suelo para comparar objetivos y los efectos secundarios sobre el escurrimiento y pérdida de suelo.

Perdida de suelo

Las pérdidas de suelo involucran, además de las partículas minerales, pérdidas de nutrimentos que reducen la capacidad productiva del recurso, la materia orgánica y la fracción húmica también se pierden continuamente. Así, las partículas de suelo son una mezcla heterogénea de material orgánico y mineral, con características propias y de diferentes tamaños (Branson *et al.*, 1981). Martínez (1983) y Dueñez (1993) señalan que al evaluar la pérdida de suelo por el escurrimiento superficial es común referirlas con las expresiones de concentración de sedimentos, erosión hídrica, producción de sedimentos o erosión superficial.

La erosión del suelo es la remoción y transporte de las partículas de la superficie del suelo por el agua y el viento (Kirkby y Morgan, 1984; Brooks *et al.*, 1991). La acción de la erosión comprende tres procesos: a) desprendimiento de partículas de suelo, b) transporte o suspensión de sedimentos y, c) deposición o agregación de sedimentos.

A diferencia del concepto de erosión, la pérdida de suelo es la cantidad de partículas que son removidas en un área sin considerar si salen de un lugar determinado o una cuenca (Branson *et al.*, 1981). La tasa o proporción de erosión se considera como la pérdida de suelo de un área dada en un tiempo determinado. Se expresa en unidades de volumen o peso.

La concentración de sedimentos es la cantidad de partículas disueltas en el escurrimiento de un evento de precipitación (Wilcox *et al.*, 1988; Gutiérrez *et al.*, 1990b). La concentración de sedimentos se entiende como la salida total de partículas de suelo contenidas en el volumen del escurrimiento superficial de una cuenca, medida en un período específico de tiempo y en un punto definido (Mitchell y Bubenzer, 1984; Brooks *et al.*, 1991), comúnmente usado como un índice para medir su pérdida en una cuenca (Blackburn *et al.*, 1986; Wood *et al.*, 1987; Holechek *et al.*, 1989; Dueñez, 1993).

La producción de sedimentos es el flujo total de sedimentos de una cuenca hidrológica o de un área sujeta a evaluar durante un tiempo determinado (Kirkby y Morgan, 1984). No toda la pérdida de suelo se deposita en el sistema de corrientes una parte se deposita en depresiones de la misma cuenca. La producción de sedimentos es el resultado del proceso de erosión hídrica y, esta en función de la topografía, el clima y el suelo (Gifford *et al.*, 1970); por lo anterior, el material que se transporta hacia un punto de interés es una erosión laminar o en canalillos en la superficie del suelo o erosión superficial.

A diferencia de los sedimentos, la sedimentación se define sedimentación como el depósito de materiales procedentes de rocas preexistentes que son arrastrados por el viento o por las aguas, o están disueltos en ellas o que han formado parte de los organismos (Mora y Aguilar, 1966).

La erosión superficial o producción de sedimentos es el flujo total de sedimentos de una cuenca hidrológica o de una cuenca de drenaje durante un tiempo determinado (Kirkby y Morgan, 1984). Añaden tres categorías generales de procedimientos para estimar la producción de sedimentos, estas son: a) ecuaciones predictivas, b) computaciones de erosión bruta y de tasas de depósito, de sedimentos y, c) mediciones de carga de sedimento en suspensión o deposición de sedimentos.

La erosión provoca que el suelo sea desplazado de su lugar de origen y depositado en el mar u otro lugar cerca o hacer un largo recorrido hasta el mar, dependiendo del grado de pendiente y sus características de cubierta, de la extensión superficial y de la velocidad y volumen de escurrimiento. Este desplazamiento de las partículas de suelo desprendidas dependerá del tamaño, la densidad y la forma de las partículas. Las arenas gruesas que se desprenden del suelo por erosión, son las que recorren menos distancias y las que se sedimentan primero, luego lo hacen las arenas finas y los limos, Esto a medida que disminuye la velocidad de escurrimiento y por último las arcillas y coloides del suelo (Kirkby y Morgan, 1984).

Factores que Afectan la Perdida de suelo.

La cubierta vegetal, clima, topografía, características y el uso del suelo son factores que determinan la erosión. Por lo cual, el impacto fuera de la cuenca depende de los factores que controlan la producción de sedimentos dentro de la cuenca (Brooks *et al.*, 1991). La erosión superficial es el principal

problema causado por la erosión hídrica, la cual a su vez es controlada por la cubierta vegetal (Holechek *et al.*, 1989). Los efectos de la precipitación en la erosión son producidos por el impacto de las gotas de lluvia, el arrastre y transporte de sedimentos en el escurrimiento (Branson *et al.*, 1981; Spurr y Barnes, 1982; Pritchett, 1986; Brooks *et al.*, 1991).

Respecto a la pendiente, la erosión aumenta conforme aumenta la inclinación y longitud de la pendiente, como resultado de los aumentos en velocidad y volumen del escurrimiento superficial. Además, mientras que en un terreno plano las partículas salpican en todas direcciones, en un terreno con pendiente, más partículas son salpicadas ladera abajo que ladera arriba, esta proporción aumenta conforme la pendiente es más abrupta (Chepil *et al.*, 1964).

Algunas Consideraciones de la Problemática de la Erosión Superficial

La degradación del suelo ha sido definida por FAO (1980) como un proceso que reduce la capacidad actual y potencial del suelo para producir cuantitativa y cualitativamente bienes o servicios.

La erosión como proceso se lleva a cabo en condiciones naturales se considera como una forma más de formación del relieve. Si la erosión se incrementa por las actividades humanas se manifiesta la erosión acelerada o inducida; Por ejemplo, se presenta al manipular la capa arable y cobertura vegetal, al promover la sobreutilización de los recursos, el desmonte o la deforestación de grandes áreas. De acuerdo al agente, principalmente se conocen dos tipos de erosión: hídrica y eólica; un tercer agente se considera a la gravedad. La erosión hídrica cuando ocurre se produce a través de un flujo

superficial del agua. Las formas más comunes de erosión hídrica son por salpicamiento, laminar, en canalillos, en cárcavas, en pináculos y en pedestales.

La erosión superficial, siendo un proceso natural por lo general es lento en las áreas forestales, aún en las regiones más montañosas y escarpadas, donde la mejor barrera es la cubierta vegetal y la hojarasca que absorben y reducen el impacto de las gotas de lluvia (Prichett, 1986) y la turbulencia del flujo del agua (Holechek *et al.*, 1989; Brooks *et al.*, 1991).

El flujo de agua superficial puede acarrear materiales del suelo en función de su fuerza hidráulica que fricciona sobre la superficie y ejerce mayor fuerza y, la erosión puede ocurrir aún en pendientes suaves. Estas condiciones son comúnmente encontradas en las zonas semiáridas. La erosión severa que se asocia con la formación de cárcavas, puede iniciar movimientos de masas en las pendientes abruptas de las paredes de los cauces, importantes en la remoción total de sedimentos (Figueroa, 1991).

Por otro lado, la concentración de sedimentos es influenciada en principio por el desprendimiento del suelo por la lluvia, el arrastre y la deposición de los materiales (Wilcox *et al.*, 1986; Gutiérrez *et al.*, 1990b; Brooks *et al.*, 1991). Puede variar con el tiempo en respuesta al límite máximo de transporte definido por la habilidad del escurrimiento para transportar el sedimento y al límite mínimo de sedimentos definido por la resistencia del suelo para ser removido (Hairsine y Rose, 1992). Esto es el problema principal causado por el escurrimiento superficial, el cual a su vez es controlado por la cubierta vegetal (Holenchek *et al.*, 1989). Además, este proceso debe de ser diferenciado del proceso de erosión y del concepto pérdida de suelo (Mitchell y Bubenzer, 1984), ya que la concentración de sedimentos es la cantidad total de partículas de suelo removidas de un área por la acción dispersante de las gotas de lluvia o el viento, la suspensión y el transporte de las partículas en el

escurrimiento superficial o en el aire y el depósito de las partículas en un sitio en particular. Estos sedimentos son una mezcla heterogénea de material orgánico y mineral en diferentes tamaños de partículas con una variabilidad de propiedades químicas y naturales (Branson *et al.*, 1981).

Uso de la Simulación de Lluvia en Estudios de Procesos Hidrológicos

Los simuladores de lluvia han sido desarrollados en décadas recientes, principalmente para responder a las necesidades de la investigación relacionada con los procesos de infiltración, escurrimiento, sedimentación, erosión, y de interceptación y redistribución de lluvia por la vegetación (Návar, 1993).

Neff (1979) menciona que la simulación de lluvia es la técnica de aplicar agua en parcelas de una manera similar a la lluvia natural, que es una herramienta que ha sido utilizada por muchos años en estudios de erosión, infiltración, escurrimiento y erosión. Las ventajas que tiene su utilización son en los resultados que se obtienen más rápidamente, sobre todo en condiciones donde las precipitaciones son escasas y menos frecuentes, como es en las zonas áridas y semiáridas; se tienen además, un mayor control en cuanto a las intensidades y duraciones seleccionadas; un costo razonable debido al grado de control ejercido sobre la simulación; el costo por unidad de dato es muy bajo comparado con el costo por unidad de dato de un largo experimento; y dependiendo de la lluvia natural, proveen un máximo control sobre: cuándo, dónde y cuáles datos deberán ser colectados.

La simulación de lluvia presenta como desventajas el que las áreas tratadas son muy pequeñas, pudiendo ser o no significativas del área que nos interesa, los simuladores de lluvias no producen una distribución del tamaño de gota que sea representativo de una tormenta natural, pero debido al ambiente

científico que requiere respuestas rápidas, el simulador de lluvia es la alternativa más viable.

Estudios Relacionados

Para el nordeste de México, la infiltración en los suelos dominados por vertisoles y con diferentes usos del suelo, Navar y Synnott (2000) mencionan que la infiltración es mayor y muy variable debido a la dinámica de formación de grietas del suelo. Asimismo, al realizar el ajuste de la infiltración bajo los modelos de infiltración de Kostiakov modificado, Green y Amp, Horton y Philip, encontró que los coeficientes de determinación, error estándar, la probabilidad de los parámetros y la independencia de ajuste, la normalidad y la varianza común son mejor ajustados los datos por el modelo de Kostiakov modificado. Por otro lado, Yukawua y Onda (1995) estudiaron el efecto del estrato bajo de una plantación de *Chamaecyparis obtusa*; señalan la importancia que tiene en la inhibición del encostramiento del suelo y en la infiltración más que en el espacio poroso del suelo, relacionándose con el suelo desnudo.

En zonas entre dosel de *Pinus-juniperus* en New México, Wilcox (1994) reporta mayor escurrimiento a mitad del verano con la presencia de lluvias intensas y a finales del invierno por el derretimiento de la nieve y las lluvias, además de mayor porcentaje de flujo de agua (16 %) cuando la precipitación excedió la media anual y cuando la precipitación fue del promedio anual presentó un 3 %. Además, encontró una diferencia evidente del mayor escurrimiento en las áreas disturbadas, principalmente en el verano. A partir de la esta investigación, y para otras regiones semiáridas, supone: a) la cantidad de escurrimiento varía con la escala (área de contribución del escurrimiento), b) la infiltración del suelo es dinámica y c) la erodabilidad del suelo sigue un ciclo anual, siendo mayor a finales del invierno y más baja al final del periodo de lluvias del verano.

Chandler y Walter (1988) al evaluar la respuesta del escurrimiento superficial en suelos calcáreos someros y con pendientes en cuencas con un uso forestal y un sitio de pastizal tuvieron una respuesta de menor a mayor escurrimiento, desde un 3 a un 76 %, respectivamente; los sitios con bosque mostraron la mayor respuesta de inicio en cantidad y tiempo del escurrimiento, lo contrario se presentó en el sitio de pastizal. Asimismo, los sitios forestales tuvieron un mayor escurrimiento subsuperficial.

Wagner y Lenz (1989) mencionan que cuando se trata de suelo impermeable y de pendiente suave con superficie compacta, la infiltrabilidad será bastante reducida, pero si el suelo es de superficie friable y sin agregados, capas rocosas del subsuelo friables y surcadas de grietas, existen condiciones favorables para un abundante abastecimiento subterráneo de agua que en la época de sequía aprovechan los manantiales.

En un trabajo realizado en un área de *Pinus-Juniperus* por Lyons y Gifford (1980) los resultados obtenidos señalan que las acumulaciones o pérdida de sedimentos no presenta diferencia significativa entre sitios utilizados a diferentes profundidades del suelo consideradas, la producción de sedimentos tuvo un rango desde los 1,065 a 8,476 Kg./ha, mencionando que esta producción de sedimentos es más influenciada por el tiempo en que el agua esta retenida, debido a la obstrucción de los poros del suelo por las partículas finas, lo cual se observa a partir de los 28 min. de haber iniciado la prueba de simulación de lluvia, ya que la infiltración presentó una disminución.

Stendnick (1987) menciona que el efecto potencial de las prácticas de manejo de un bosque sobre la erosión es bajo cuando son implementadas las mejores prácticas para cada sitio en particular y dependiendo de los objetivos

que se persigan con ésta, ya que afectarán directamente a los problemas de erosión de suelo que se presenten; y, las actividades asociadas con la corta y el arrastre de la madera, así como la construcción y el mantenimiento de caminos dan como resultado el disturbio del suelo y de la vegetación y con esto el incremento en la susceptibilidad de erosión del suelo. Y que además estos disturbios alteran el ciclo hidrológico, más que todo por el desprendimiento y transporte del sedimento.

Robinsón (1986) menciona que en una reforestación la pérdida del suelo por escurrimientos es incrementada anualmente debido a la formación de flujos superficiales de agua en un área y entre precipitaciones; en los períodos de lluvia se originan y forman canales debido a la acción de remoción del suelo por el impacto fuerte y constante de las gotas de lluvia. Al principio se forma e inicia un fluido lento, pero que con el tiempo se vuelve rápido; esto, se debe principalmente a que los árboles todavía no son adultos, pero es evidente que con el tiempo la magnitud de estos daños disminuirán considerablemente debido al crecimiento de los propios árboles y al establecimiento de la vegetación, ayudando con ello a disminuir los escurrimientos y por ende aumentar la infiltración.

Heede (1987) cuantifica los sedimentos desprendidos, liberados o acarreados y, si son influenciados por una masa forestal de *Pinus-Juniperus* en Arizona, con tres tipos de dosel de cobertura con especies maderables, no maderables y otra de maderable con cortas en franjas. Encontró en sus resultados menos erosión superficial en el área de maderables con franjas, solo maderables y áreas no maderables, respectivamente. Concluye que la causa principal de que no exista desprendimiento y corriente de sedimentos es la acumulación de hojarasca (36 cm de profundidad) que forman montículos en los espacios que hay entre los árboles de tal manera que las oportunidades de desprendimiento y acarreo de sedimentos es mínimo. Además, ésta

acumulación de hojarasca disminuyen hasta un 57 por ciento el efecto de la pendiente, siendo estos resultados similares a los obtenidos en un área de *Pinus ponderosa* y chaparral.

Gifford *et al.* (1970) al evaluar el impacto del desmonte de un área de *Pinus-Juniperus* y su resiembra con zacates, no encontraron una consistencia en el incremento o decremento en la infiltrabilidad y la erosión. Concluyen que estos procesos no fueron afectados como resultado de las prácticas de transformación. Además, señalan que la interacción de los factores bióticos, edáficos y climáticos determinan la infiltrabilidad y la erosión en un área o punto dado del ecosistema.

En áreas de plantaciones de *Pinus patula*, *Cupressus lusitanica* y *Eucalyptus* spp. al norte de Tanzania, con etapas de desmonte de 1 año y replantado y de 2 años con regeneración natural, segunda rotación con cultivos de agricultura, primera rotación sin disturbar y, desmontados, extraídos y apacentados intensivamente, Abeli y Sawe (1999) refieren que dependiendo de la practica de manejo o condición del sito en comparación a un bosque natural sin disturbar la infiltración decrece en un 36 a 96 %, siendo la mayor en los sitios con extracción y pastoreo intensivo.

Gutiérrez y Salazar (1986) realizaron un estudio para determinar si tres etapas ^{de} plantación de pinos incrementaron la infiltración. Además, conocer su tendencia en diferentes edades de plantación y épocas del año. Para cumplir con ello, se hicieron estimaciones de infiltración en sitios con árboles de 5, 9 y 14 años de edad y en un área sin reforestar durante primavera, verano, otoño e invierno. Encontrando de acuerdo al análisis realizado que la infiltración se ha incrementado con la reforestación y tienen diferencias entre las edades de la plantación a cualquier intervalo

de tiempo. La infiltración fue mayor en el sitio con árboles de 5 años, seguido por el de 14 y 9 años de edad; mientras la menor infiltración se presentó en el área sin reforestar. Entre épocas del año, en los primeros minutos no presentaron diferencias, teniendo variaciones después de 30 minutos de iniciada las estimaciones; la mayor entrada de agua al suelo se presentó durante el verano.

Gutiérrez *et al.* (1990) en la Sierra Zapalinamé evaluaron la infiltrabilidad a tres diferentes distancias y tres diferentes edades del arbolado. Encontrando que la infiltrabilidad es influenciada por la edad conforme transcurre el tiempo de una lluvia. Así mismo, mencionan que con la distancia entre árboles, la infiltración se reduce.

En un estudio para determinar la erosión superficial en cuatro etapas de plantación con *Pinus halepensis*, Gutiérrez *et al.* (1990b) mencionan que durante los primeros cinco minutos de aplicar agua con un simulador, la erosión en todos los sitios fue similar; pero después de 10 minutos, mostró un comportamiento sostenido en las etapas de plantación en la zona de reforestación Zapalinamé. Además, los resultados muestran que el área sin reforestar presenta mayores pérdida de suelo que las áreas con arbolado, y es asociado a la cubierta total de gramíneas, herbáceas, arbustos, hojarasca y microflora.

MATERIALES Y METODOS

El área de estudio se encuentra situada dentro de los límites de la Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". La reforestación está localizada entre el paralelo 25° 23' 42" latitud norte y entre el meridiano 100° 59' 57" de longitud Oeste y la altitud va desde 1620 a 1985 metros sobre el nivel del mar; abarcando una superficie aproximada de 2000 ha. La forma que presenta el área es un polígono irregular limitada al norte con el arroyo del mimbre, al sur colinda con el ejido la angostura, al este con terreno escarpado propiedad de la universidad y al oeste con la carretera Saltillo - Concepción del Oro, Zacatecas; está situada a 7.5 Km. al sur del centro de Saltillo y a un Km. al suroeste del edificio principal de la universidad (Mathus y Castañeda, 1978; Gutiérrez y Salazar, 1986).

Clima

De acuerdo a las modificaciones propuestas por García (1973) al sistema de clasificación de Köppen, el área de esta reforestación presenta un clima que puede clasificarse como:

B W h w (x') (e)

BW = clima muy seco, cuyo coeficiente P/T es mayor de 22.9

h = Temperatura media anual entre 18 y 22 °C, considerándose cálido con invierno fresco

W(x') = Régimen de lluvias de verano = por lo menos diez veces mayor cantidad de lluvia en el mes más húmedo que en el mes más seco, el porcentaje de lluvias invernal es mayor de 10.2

(e) = Clima extremo, con oscilación anual de las temperaturas medias mensuales entre 7 y 14°C

La precipitación media anual está por arriba de 350 mm, la cual se encuentra mal distribuida a través del año, puede caer en varios días o en varios meses, en forma de llovizna, lluvia, granizo o nieve. Generalmente el 80 por ciento de la precipitación se presenta durante los meses de mayo a noviembre. La temperatura media anual es aproximadamente de 18°C fluctuando grandemente y registrando mínimas de 15°C y máximas de 38°C; presenta cálido verano e invierno con fuertes heladas, en ocasiones desde octubre hasta principios de abril.

Dominan los vientos del noroeste, los huracanes o ciclones que pueden llegar al área son más benéficos que perjudiciales, ya que por la influencia de la Sierra Madre Oriental sólo llegan en forma de lluvia pertinaz con ráfagas de vientos moderados (Mathus y Castañeda, 1978).

Suelos

Los suelos son de origen aluvio-coluvial pertenecientes a la calcificación taxonómicas durosoll, y el subsuelo se caracteriza por la presencia de estratos continuos de calizas. Los suelos presentan un epipedón mollico que descansa directamente su horizonte petrocálcico cementado por carbonatos de calcio, el primer horizonte presenta colores muy oscuros que varían desde 10 YR 3/2, hasta 10 YR 3/4, una textura que varia desde franco - arcillosa hasta un migajon arcilloso, la estructura generalmente en bloques subangulares medios y fuertes, consistencia suelta en seco, friable en húmedo y ligeramente adhesiva y plástica en mejorado, su PH oscila entre 7.5 y 8.5, el espesor del suelo varia entre 30 cm y 2 m, de los 50 cm en adelante es común que se

presente un horizonte petrocálcico de color blanco (10 YR 8 /2) de estructura masiva y con una reacción violenta al HCl (Mathus y Castañeda , 1978; Oviedo, 1980; Gutiérrez y Salazar, 1986).

Vegetación

Según la opinión de campesinos originarios de la zona y la presencia de algunos relictos en el área, la sierra de Zapalinamé se encontraba anteriormente cubierta por masas de coníferas con predominancia de *Pinus cembroides* Zucc. Las masas fueron disminuyendo con el tiempo debido a la sobreutilización del recurso natural, lo cual ocasionó altos grados de disturbio tanto en la Sierra de Zapalinamé como con los valles aledaños. La vegetación en el área de estudio arbustiva, herbácea y gramíneas se exhibe en el cuadro 1. (Dueñez, 1987)

Debido a tales problemas y tratando de retener el suelo y el agua de la zona, desde 1960 a 1978 se realizaron algunas reforestaciones en el área en las cuales la especie principal es *Pinus halepensis* Mill. Además del pino alepo, se han plantado algunas otras especies como: *Pinus cembroides* Zucc., *P. ayacahuite* Ehr., *Cupressus arizonica* Green, *C. sempervirens* Linn, *Melia azederach* Linn, *Fraxinus* sp. y *Agave* sp. La vegetación asociada con las plantaciones es muy variable.

Cuadro 1. Especies principales existentes en la zona de reforestación de Zapalinamé (Dueñez, 1987).

| ARBUSTIVAS | HERBACEAS | GAMINEAS |
|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| <i>Acacia farnesiana</i> | <i>Croton dioicus</i> | <i>Aristida sp.</i> |
| <i>Agave asperrima</i> | <i>Desmanthus sp.</i> | <i>Bouteloua curtipendula</i> |
| <i>A. lechuguilla</i> | <i>Dyssodia setifolia</i> | <i>B. gracilis</i> |
| <i>Berberis trifoliolata</i> | <i>Ephedra trifurca</i> | <i>B. Hirsuta</i> |
| <i>Brickellia laciniata</i> | <i>Gnapholium sp</i> | <i>Eragrostis sp.</i> |
| <i>B. veronicaefolia</i> | <i>Solanum eleagnifolium</i> | <i>Erioneuron pilosum</i> |
| <i>Buddleja scordioides</i> | <i>Xanthocephalum sp.</i> | <i>E. Pulchellum</i> |
| <i>Condalia warnokii</i> | <i>Zexmenco hispida</i> | <i>Hilaria berlangeri</i> |
| <i>Dalea lanata</i> | <i>Zinnia acerosa</i> | <i>Leptochloa dubia</i> |
| <i>Dasyilirion cedrosanum</i> | | <i>Lycurus phleoides</i> |
| <i>Ephedra pedunculata</i> | | <i>Muhlenbergia sp.</i> |
| <i>Mimosa biuncifera</i> | | <i>Panicum hallii</i> |
| <i>Nolina cespitifera</i> | | <i>P. Obtusum</i> |
| <i>Opuntia imbricata</i> | | <i>Sporobolus airoides</i> |
| <i>Rhus microphylla</i> | | <i>Stipa clandestina</i> |
| <i>Yuca carnerosana</i> | | |

Descripción del Área de Estudio

Los sitios seleccionados para realizar el presente estudio fueron reforestados con *Pinus halepensis* Mill. Se seleccionaron cinco etapas de plantación y un área sin plantar la cual se uso como control. Estos sitios se describen a continuación (Mathus y Castañeda, 1978; Oviedo, 1980; Dueñez, 1987).

Sitio reforestado en 1961. Esta área se encuentra a una altitud de 1830 msnm, presenta una pendiente de 8 a 15 por ciento, el suelo posee una profundidad de 15 a 50 cm, mientras que en la parte superior los suelos son

someros, observándose alta pedregosidad y afloramiento rocosos. Es de textura migajón arcillo-arenoso, pH alcalino variando de 8.0 a 8.5, con exposición sureste, la vegetación asociada es principalmente *Bouteloua curtipendula*, *B. gracilis*, *Aristida* sp., *Lycurus phleoides*, *Tiquilia canescens*, *Zinnia acerosa*, *Xanthocephalum* sp., *Opuntia rastrera*, *Mimosa zygophylla*, *Opuntia leptocaulis* y *Condalia spathulata*; el área cubre una superficie de 72.23 ha.

Sitio reforestado en 1972. Se encuentra a una altitud de 1920 msnm con una pendiente de 10 a 25 por ciento, el suelo varía en profundidad de 10 hasta 50 cm, apreciándose afloramiento rocosos y pedregosidad en un 40 por ciento del área, la textura es migajón-arenoso, pH variando de 8.3 a 8.5, exposición sur, la vegetación más común es: *Bouteloua curtipendula*, *Erioneuron* sp., *Lycurus phleoides*, *Aristida* sp., *Stipa* sp., *Hilaria* sp., *Stipa tenuissima*, *Buddleja scordioides*, *Dyssodia setifolia*, *Solanum eleagnifolium*, *Ephedra pedunculata*, *Condalia* sp., *Mimosa* sp. y *Gymnosperma glutinosum*, el sitio cubre una superficie de 96.3 ha.

Sitio reforestado en 1975. Tiene una altitud de 1930 msnm, pendiente variando de 5 a 30 por ciento, el suelo es somero alcanzando hasta 25 cm, la plantación se hizo sobre lomeríos y la capa petrocálcica se encuentra aflorando en casi toda la superficie, el área está surcada por varias cárcavas, presenta piedra y grava en un 35 por ciento, textura migajón arenoso, con exposición sur. Las especies principales presentes son: *Stipa tenuissima*, *Aristida* sp., *Muhlenbergia* sp., *Bouteloua gracilis*, *Xanthocephalum serothrae*, *Dyssodia setifolia*, *Opuntia* spp., *Mimosa biuncifera*, *Agave lechuguilla*, *Agave* sp., *Cercocarpus* sp. y *Ephedra antisyphilitica*. El área comprende una superficie 68.4 ha.

Sitio reforestado en 1976. Se encuentra a una altitud de 1940 msnm, con pendiente de 5 a 25 por ciento, suelo somero con profundidades de 10 a 25 cm, capa petrocálcica en algunas partes aflorando y pedregosidades en un

40 por ciento. Con textura franca y exposición sur. La vegetación presente esta representada por: *Bouteloua curtipendula*, *Muhlenbergia* sp., *Hilaria* sp., *Stipa* sp., *Lycurus pheoides*, *Xanthocephalum sarothrae*, *Dyssodia setifolia*, *Zinnia acerosa*, *Gaura* sp., *Mimosa biuncifera*, *Berberis trifoliata*, *Gymnosperma glutinosum*, *Agave lechuguilla*, *Opuntia* spp. y *Acacia* sp. El sitio abarca una superficie de 57.6 ha.

Sitio reforestado en 1978. Altitud de 1840 msnm, pendiente de 5 a 15 por ciento. El suelo es compactado con profundidad de 10 a 25 cm, pedregosidad abundante, textura franca, exposición oeste. La vegetación presente es: *Muhlenbergia* sp., *Bouteloua curtipendula*, *B. gracilis*, *Lycurus phleoides*, *Aristida* sp., *Stipa* sp., *Hilaria* sp., *Gnaphalium* sp., *Gaura* sp., *Hymenoxys scaposa*, *Condalia warnochii*, *Mimosa biuncifera*, *Lindlerea mespiloides*, *Berberis trifoliata*, *Gymnosperma* sp., *Opuntia* spp., y *Agave* sp. La plantación comprende en superficie 82.86 ha.

Metodología

Las plantaciones bajo estudio se seleccionaron debido a que cumplían las consideraciones para cumplir con los objetivos del trabajo, Primero se llevaron a cabo recorridos preliminares para ubicar los sitios con características específicas deseables en cada una de las plantaciones. Se seleccionaron cinco plantaciones con diferente edad y un testigo en las cuales se ubicaron cinco sitios por plantación los cuales fueron seleccionados teniendo en cuenta las siguientes consideraciones: además de que presentara características topográficas deseables que presentaran accesibilidad y que estuvieran ubicados entre línea y línea de la plantación.

Simulación de Lluvia

Las pruebas de simulación de lluvias se realizaron durante los meses de marzo, abril y mayo del año 2002. El simulador empleado es similar a aquel descrito por Wilcox *et al.* (1986)

Se utilizaron parcelas de muestreo de 1m, delimitadas por un aro metálico, el cual se enterró en el suelo a una profundidad aproximada de cinco centímetros, insertando una canaleta en la parte inferior del aro; enseguida se monto el simulador a una altura de 154 cm del suelo a la boquilla y al mismo tiempo se niveló con el centro de la parcela. La parcela fue cubierta con un plástico para evitar que al momento de regular la intensidad de lluvia esta incidiera sobre los parámetros a evaluar; posteriormente se coloca la cortina rompevientos.

Una vez instalado el simulador de lluvias se reguló y aplicó una intensidad de 15.87 cm hr^{-1} , retirando el plástico de la parcela y se inicio la aplicación de la lluvia sobre la misma. Cada evento de simulación tuvo una duración de 40 minutos. La alimentación de flujo de agua al simulador provenía por gravedad de un tonel de 450 litros, adaptado para el propósito mediante una ponybomba de 12 volts.

Estimación de la tasa de escurrimiento

El volumen de escurrimiento se determinó en periodos de tiempo a 1, 3, 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35, y 40. Esto para cada una de las cinco repeticiones. La tasa de escurrimiento (cm hr^{-1}) se cálculo de la siguiente forma:

$$\text{Tasa de escurrimiento sup.} = \frac{\text{Volumen de escurrimiento (cm}^3\text{)} \cdot 12 \text{ periodos}}{\text{Área de la parcela (cm}^2\text{)} \cdot 1 \text{ hr}} = \text{cmhr}^{-1}$$

Estimación de la infiltrabilidad

La infiltración se determinó por la diferencia de la intensidad de lluvia aplicada y la tasa de escurrimiento en cada periodo de cinco minutos.

$$\text{Infiltrabilidad} = \text{Intensidad de Lluvia} - \text{Tasa de Escurrimiento} = \text{cmhr}^{-1}$$

Estimación de la Concentración de Sedimentos

Del volumen de escurrimiento recolectado en cada parcela de cada periodo se tomó una muestra de 0.5 l, llevada al laboratorio se separó los sedimentos con papel filtro de 1 micra, secándose en estufa a 65° C, durante 24 horas y registrando su peso a la décima de gramo más cercano.

Estimación de la erosión superficial

En base al volumen total de escurrimiento para cada parcela, se calculó la erosión superficial mediante el volumen de escurrimiento y la concentración de sedimentos por periodo de tiempo, los valores se transformaron a kilogramos por hectárea (Kg ha⁻¹).

Estimación de las características del suelo

Contenido de humedad y densidad aparente. Antes de iniciar la prueba de la simulación, la proximidad de las parcelas se colectó una muestra de suelo en los primeros 10 cm de profundidad, la cual fue pesada y posteriormente secada a la estufa a una temperatura de 65 °C hasta peso constante. Con esta información se determinó el contenido de humedad del suelo (%) por el método gravimétrico y la densidad aparente (g cm^{-3}) por el método de la parafina.

$$\text{Humedad del suelo} = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} (100) = \%$$

$$\text{Densidad Aparente} = \frac{\text{Masa de Sólidos}}{\text{Volumen Total (cm}^3\text{)}} = (\text{g cm}^{-3})$$

Profundidad del suelo. Después de cada simulación de lluvia, en un perfil perpendicular a la parcela se realizó la medición de la profundidad del suelo con un flexómetro y registrar el valor promedio.

Temperatura del suelo y del agua aplicada. Antes de cada simulación de lluvia se determinó la temperatura del suelo y el agua por medio de un termómetro, los cuales se registraron en °C.

Pendiente. La pendiente fue determinada por medio de un clisímetro expresado en grados.

Textura y materia orgánica. Al finalizar cada prueba de simulación, se colectó una muestra de suelo de cada parcela en los primeros 10 cm, la cual se

Estimación de las características del suelo

Contenido de humedad y densidad aparente. Antes de iniciar la prueba de la simulación, la proximidad de las parcelas se colectó una muestra de suelo en los primeros 10 cm de profundidad, la cual fue pesada y posteriormente secada a la estufa a una temperatura de 65 °C hasta peso constante. Con esta información se determinó el contenido de humedad del suelo (%) por el método gravimétrico y la densidad aparente (g cm^{-3}) por el método de la parafina.

$$\text{Humedad del suelo} = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} (100) = \%$$

$$\text{Densidad Aparente} = \frac{\text{Masa de Sólidos}}{\text{Volumen Total (cm}^3\text{)}} = (\text{g cm}^{-3})$$

Profundidad del suelo. Después de cada simulación de lluvia, en un perfil perpendicular a la parcela se realizó la medición de la profundidad del suelo con un flexómetro y registrar el valor promedio.

Temperatura del suelo y del agua aplicada. Antes de cada simulación de lluvia se determinó la temperatura del suelo y el agua por medio de un termómetro, los cuales se registraron en °C.

Pendiente. La pendiente fue determinada por medio de un clisímetro expresado en grados.

Textura y materia orgánica. Al finalizar cada prueba de simulación, se colectó una muestra de suelo de cada parcela en los primeros 10 cm, la cual se

llevó a laboratorio para su análisis. La textura se determinó por el método del hidrómetro de Bouyoucus y el contenido de materia orgánica por el método de Walkey y Black.

Estimación de las características de vegetación

Para determinar estas características se delimitaron áreas circulares con un radio de 17.84 (1,000 m²) a partir del centro de la parcela donde fue la simulación de lluvia. Adicionalmente, se tomó la cobertura interna de la parcela donde se midieron los procesos hidrológicos.

Estimación de la cubierta vegetal. La determinación de este factor fue por medio del método de puntos de contacto (Pieper, 1973) modificado para un transecto de línea. Se trazaron dos transectos a partir del perímetro del sitio a la parcela, el primer transecto se trazo en el sentido de la pendiente y el otro perpendicular a la pendiente de 10 m cada uno y los puntos de contacto de 10 cm para poder ajustar un total de 200 registros de cobertura en las líneas; la cobertura del suelo se determino para gramíneas, herbáceas, arbustivas, hojarasca, pedregosidad, rocas, suelo desnudo, microflora. La cobertura interna de la parcela se siguió la misma metodología, difiriendo en la distancia de los transectos a 1 metro y espaciados a 5 cm; las variables de cobertura fueron las mismas y con 40 puntos.

Estimación de biomasa aérea: La cantidad de material vegetal se estimó en las parcelas experimentales, colectándose el material de gramíneas, herbáceas y arbustivo por el método de cosecha (Pieper, 1973) y la hojarasca manualmente. Posteriormente, se llevaron a laboratorio las cuales se secaron en una estufa a una temperatura de 65 °C hasta obtener un peso constante, registrándose el peso seco por categoría y total.

Densidad de pinos, diámetro y área basal. El registro de la densidad de *Pinus halepensis* se realizó en los sitios circulares, a los cuales se les midió su diámetro a 1.30 y posteriormente calcular su área basal.

Modelo y Análisis Estadístico.

Diseño estadístico.- Para poder cumplir con los objetivos y las hipótesis planteadas en dicho trabajo. Se utilizó una modalidad de un análisis de covarianza, donde primero se ajustaron modelos no lineales y lineales a los procesos de infiltrabilidad, escorrentía superficial y erosión y posteriormente los parámetros de los modelos fueron asociados con la edad de la plantación. La significancia estadística en la tendencia demuestra diferencias estadísticas significativas entre las fechas de plantación.

Los modelos ajustados para los procesos hidrológicos fueron;

1. Infiltrabilidad. Se ajustó el modelo de infiltrabilidad de Kostiaikov modificado, porque ha sido ajustado exitosamente por Návar y Synnott (2001) para suelo con diferente uso.

$$i = bt^{-n} + ic$$

Donde:

I = infiltrabilidad

b = intercepta

t = tiempo

n = pendiente

ic = infiltrabilidad constante

2. Escurrimiento superficial. Se utilizó el modelo exponencial en el programa gráfico de Sigma plot.

$$y = a \ln (x) + b$$

Donde:

Y = Escurrimiento superficial

a = intercepta

ln = logaritmo natural

(x) = tiempo

b = pendiente

3. Concentración de sedimentos. Se utilizó la ecuación del modelo exponencial con un estado constante en el programa grafico de Sigma plot

$$y = a (1 - e^{-bx})$$

Donde:

Y = variable dependiente (Concentración de sedimentos)

a = tasa fina

e = exponencial

b = tasa de subida

x = tiempo

4. Erosión superficial se utilizó la ecuación logarítmica con dos parámetros en el programa Excel

$$y = ae^{-bx}$$

Donde:

y = Erosión superficial

a = intercepta

e = exponencial

b = pendiente

x = tiempo

Modelos de regresión. Fueron también ajustados a los parámetros de las ecuaciones de los procesos Hidrológicos y las características del suelo y vegetación para justificar las posibles fuentes de variación de suelo y vegetación con los procesos hidrológicos y erosivos

RESULTADOS Y DISCUSION

1. Escorrentía superficial.

Los valores promedio de las tasas de escurrimiento superficial para diferentes intervalos de tiempo para cada una de las plantaciones probadas mostraron una tendencia similar (cuadro 2). La escorrentía superficial inicia en general después del primer intervalo (1 minuto) de haber iniciado la prueba y alcanza un estado casi constante a los 10 minutos de haber iniciado las pruebas (cuadro 2; figura 1). Este comportamiento es indicativo de una rápida declinación de la infiltrabilidad en tiempo, característica hidrológica de ecosistemas áridos y semi áridos.

Los modelos de potencia ajustados a las tendencias de la escorrentía no son los más adecuados porque no alcanzan un estadio constante o asintota en los tiempos marcados. La poca fuente de datos limita el ajuste estadístico de ecuaciones con un mayor número de parámetros y el análisis de covarianza se vuelve redundante con tanto parámetro estadístico. Sin embargo, las ecuaciones ajustadas sirvieron para comparar las diferencias estadísticas entre plantaciones y tuvieron buenos estadísticos de ajuste (cuadro 3; figura 2). Los coeficientes de determinación alcanzaron un valor mayor al 86 % de la variación total y con errores estándares bajos (en promedio 1.0 cm hr^{-1}).

Los parámetros de las ecuaciones de escorrentía superficial se ajustaron adecuadamente al tiempo de la plantación. Las tendencias fueron lineales con parámetros estadísticamente significativos y con coeficientes de determinación por arriba del 86 % (cuadro 3; figura 2). Estos hallazgos

Cuadro 2. Valores promedio de la tasa de escurrimiento superficial (cm hr^{-1}) estimadas a intervalos de tiempo en las diferentes etapas reforestadas con *Pinus halepensis* Mill, en la Sierra Zapalinamé.

| Tiempo | Etapas de plantación | | | | | | |
|--------|----------------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | 1961 | 1972a | 1972b | 1975 | 1976 | 1978 | Control |
| 1 | 0.0010 | 0.7538 | 0.3352 | 0.0010 | 0.0010 | 0.0010 | 0.0010 |
| 3 | 3.0211 | 2.7214 | 4.4831 | 3.9124 | 1.9942 | 3.6884 | 2.7152 |
| 5 | 7.0021 | 4.3406 | 7.1923 | 9.5226 | 7.8720 | 7.5512 | 7.8414 |
| 8 | 7.4871 | 6.7695 | 9.3921 | 9.7408 | 8.6792 | 7.7252 | 9.8964 |
| 10 | 9.0329 | 8.4221 | 9.8051 | 9.8864 | 9.0257 | 9.2012 | 10.1946 |
| 15 | 9.5511 | 8.5978 | 9.8431 | 10.2502 | 9.9348 | 9.2837 | 10.4925 |
| 20 | 9.9334 | 8.8193 | 9.8839 | 10.6140 | 10.0509 | 9.3663 | 10.8638 |
| 25 | 9.9509 | 9.0407 | 9.9246 | 10.9778 | 10.1727 | 9.4488 | 11.0356 |
| 30 | 9.9685 | 9.2621 | 9.9653 | 11.3416 | 10.2946 | 9.5313 | 11.2075 |
| 35 | 9.9861 | 9.4836 | 10.0060 | 11.7054 | 10.4164 | 9.6139 | 11.2857 |
| 40 | 10.0037 | 9.7050 | 10.0568 | 12.0692 | 10.5382 | 9.6964 | 11.4576 |

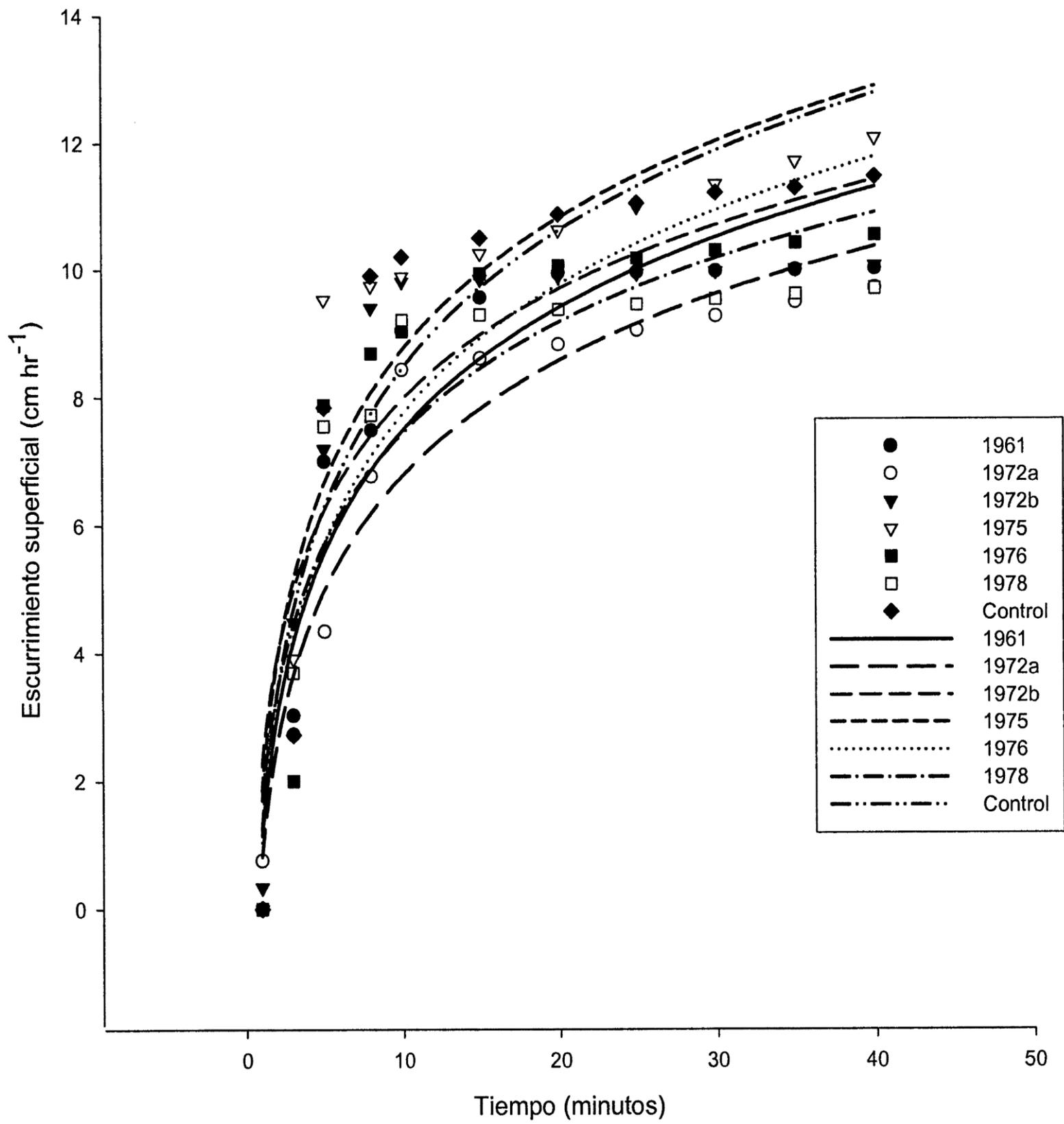


Figura 1. Valores promedio ajustados de la tasa de escurrimiento (cm hr⁻¹) de las diferentes plantaciones con *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapalinamé.

O.H.A.H.H.H.

Cuadro 3. Parámetros de la ecuación de escurrimiento superficial (cm hr^{-1}) de cada una de las etapas de plantación con *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapalinamé.

| Etapas | a (Es) | B (Es) | ic | R² | Sx |
|---------------|------------------|------------------|-----------|----------------------|-----------|
| 1961 | 10.6895 (1.0698) | -0.7957 (0.1123) | 5.866 | 0.9322 | 1.09640 |
| 1972a | 9.9077 (1.1376) | -0.6341 (0.0968) | 6.165 | 0.9467 | 1.18844 |
| 1972b | 10.1531 (0.8546) | -0.9207 (0.1177) | 5.8132 | 0.8665 | 0.86793 |
| 1975 | 12.5997 (1.0102) | -0.7378 (0.0811) | 3.801 | 0.9269 | 1.04120 |
| 1976 | 11.4146 (1.3554) | -0.7695 (0.1271) | 5.3318 | 0.9089 | 1.39248 |
| 1978 | 10.1504 (0.8445) | -0.8605 (0.1047) | 6.1736 | 0.896 | 0.86093 |
| Control | 12.339 (1.3243) | -0.7743 (0.1159) | 4.4124 | 0.9232 | 1.35993 |

Etapas = año de plantación; a = intercepto; b = pendiente; (Es) = error estándar ic = constante; R² = coeficiente de regresión, Sx = error estándar del modelo

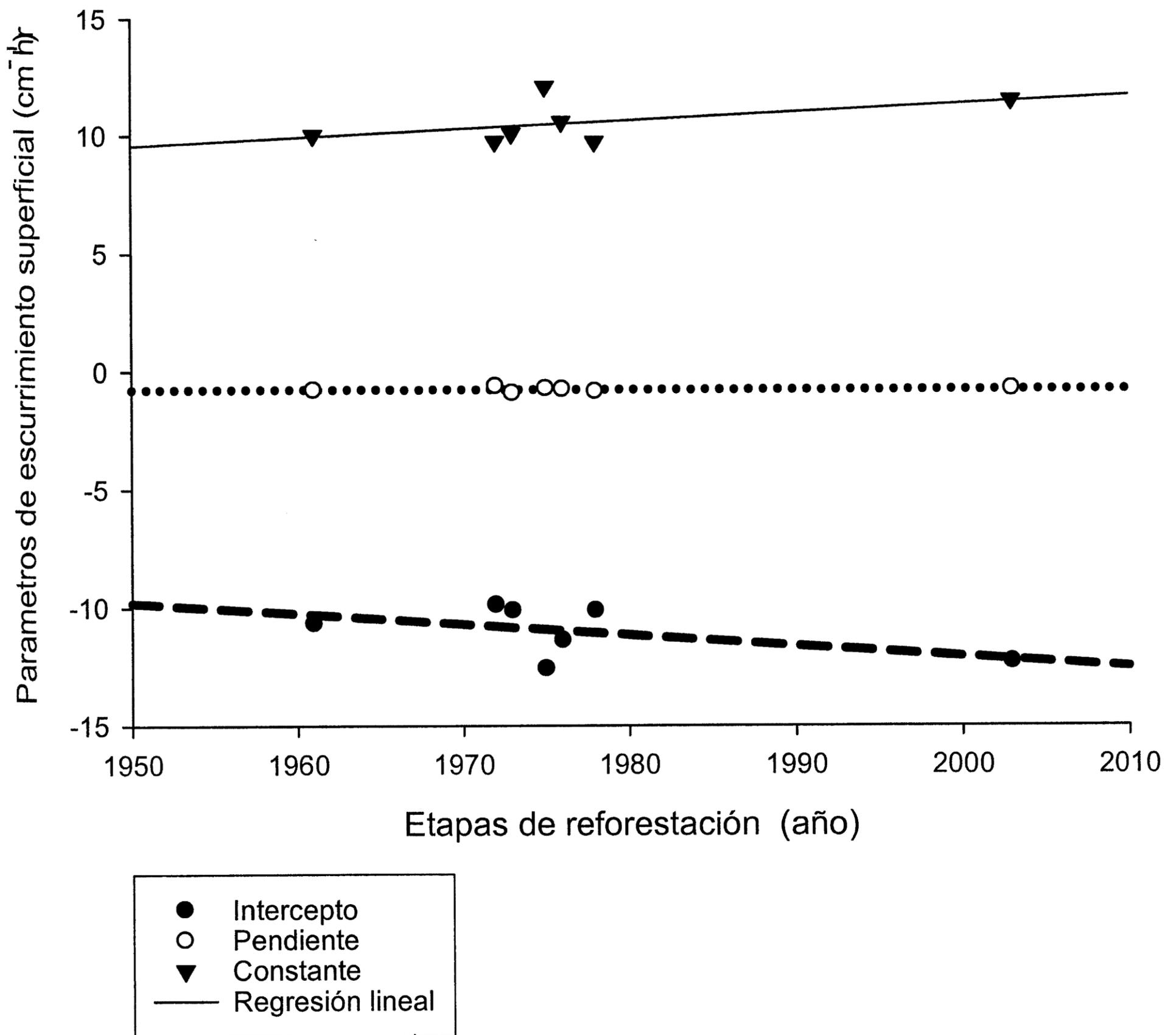


Figura 2. Parámetros de la ecuación del escurrimiento superficial (cm hr⁻¹) de cada una de las etapas de plantación con *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapalinamé.

demuestran que la escorrentía superficial incrementa inicialmente en los sitios testigo o sin plantación y tarda mayor tiempo en presentarse en las plantaciones de mayor edad. La pendiente de las ecuaciones parece estar en un estado constante; sin embargo, el estado final de la escorrentía, o asintota disminuye con la edad de la plantación. El análisis muestra que las plantaciones de mayor edad promueven en menor grado la promoción de la escorrentía superficial mientras que el testigo sin árboles promueve la mayor escorrentía superficial.

Las características del suelo parcialmente explicaron este comportamiento en forma estadísticamente significativa (cuadro 4; figura 3). La escorrentía superficial incrementa con el mayor contenido de humedad, contenido de limos y arenas y con la densidad aparente del suelo. Es decir, la edad de la plantación parece modificar parcialmente la densidad aparente y el contenido de humedad promoviendo tendencias a reducir la densidad y a incrementar el contenido de humedad del suelo por el efecto de la sombra.

Los parámetros de la vegetación que incidieron en la disminución de la escorrentía superficial en forma estadísticamente significativa fueron el contenido de hojarasca, la cobertura de arbustivas, la densidad de arbustos y la microflora del suelo. Las plantaciones mejoran con el tiempo varias de estas características biológicas del suelo y, su efecto en la disminución de la escorrentía superficial (cuadro 4; figura 4).

2. Infiltrabilidad.

Los valores promedio de las tasas de infiltrabilidad para diferentes intervalos de tiempo para cada una de las plantaciones probadas mostraron una

Cuadro 4. Parámetros de la ecuación para escurrimiento superficial (cm hr^{-1}) de las variables en las etapas de plantación con *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapalinamé

| Ecuación | R ² | Sx | F | F P |
|---|----------------|--------|---------|----------|
| a) $\beta = -0.0283 - 0.04854 (\text{Da})$ | 0.6285 | 0.0802 | 8.4592 | 0.0335 |
| b) $\alpha = -12.8700 + 0.5092 (\text{CH})$ | 0.4506 | 0.0777 | 4.1019 | 0.0987 |
| c) $\alpha = -23.74 - 0.5087 (\text{LI})$ | 0.007 | 0.0574 | 11.7151 | 0.0188 |
| d) $ic = 20.71 + 0.4088 (\text{LI})$ | 0.6588 | 0.0528 | 9.6567 | 0.0266 |
| e) $\alpha = -1.5590 + 0.2021 (\text{AN})$ | 0.6242 | 0.0643 | 8.3066 | 0.0345 |
| F) $ic = 3.3250 + 0.1529 (\text{AN})$ | 0.5251 | 0.0623 | 5.5307 | 0.0654 |
| g) $\alpha = -5.1300 + 0.2227 (\text{G})$ | 0.6382 | 0.0631 | 8.8203 | 3.12E-02 |
| h) $ic = 5.8070 + 0.1771 (\text{G})$ | 0.5973 | 0.0574 | 7.4164 | 0.0416 |
| l) $\alpha = 12.3992 + 0.0693 (\text{H})$ | 0.5868 | 0.0674 | 7.1018 | 0.0445 |
| j) $ic = 11.4833 - 0.0505 (\text{H})$ | 0.4650 | 0.0662 | 4.3466 | 0.0915 |
| k) $ic = 11.3700 - 0.1461 (\text{A})$ | 0.4590 | 0.0665 | 4.2425 | 0.0945 |
| l) $\beta = 0.1697 - 0.1325 (\text{MF})$ | 0.5011 | 0.0929 | 5.0228 | 0.0751 |
| m) $\alpha = -8.2740 - 0.1117 (\text{P})$ | 0.7396 | 0.0535 | 14.2015 | 0.0130 |
| n) $ic = 8.4990 + 0.0802 (\text{P})$ | 0.5586 | 0.0601 | 6.3258 | 0.0535 |
| o) $\alpha = -6.4590 - 0.0089 (\text{Dar})$ | 0.5530 | 0.0701 | 6.1872 | 0.0553 |

β = pendiente, α = intercepta, ic = intensidad constante, Da = densidad aparente, CH = contenido de humedad, LI = limo, AN = arena, G = gramíneas, H = hojarasca, A = arbustivas, MF = microflora, P = pedregosidad, Dar = densidad de arbustos, R^2 = coeficiente de regresión, Sx = error estándar del modelo, F P = probabilidad

UNAM

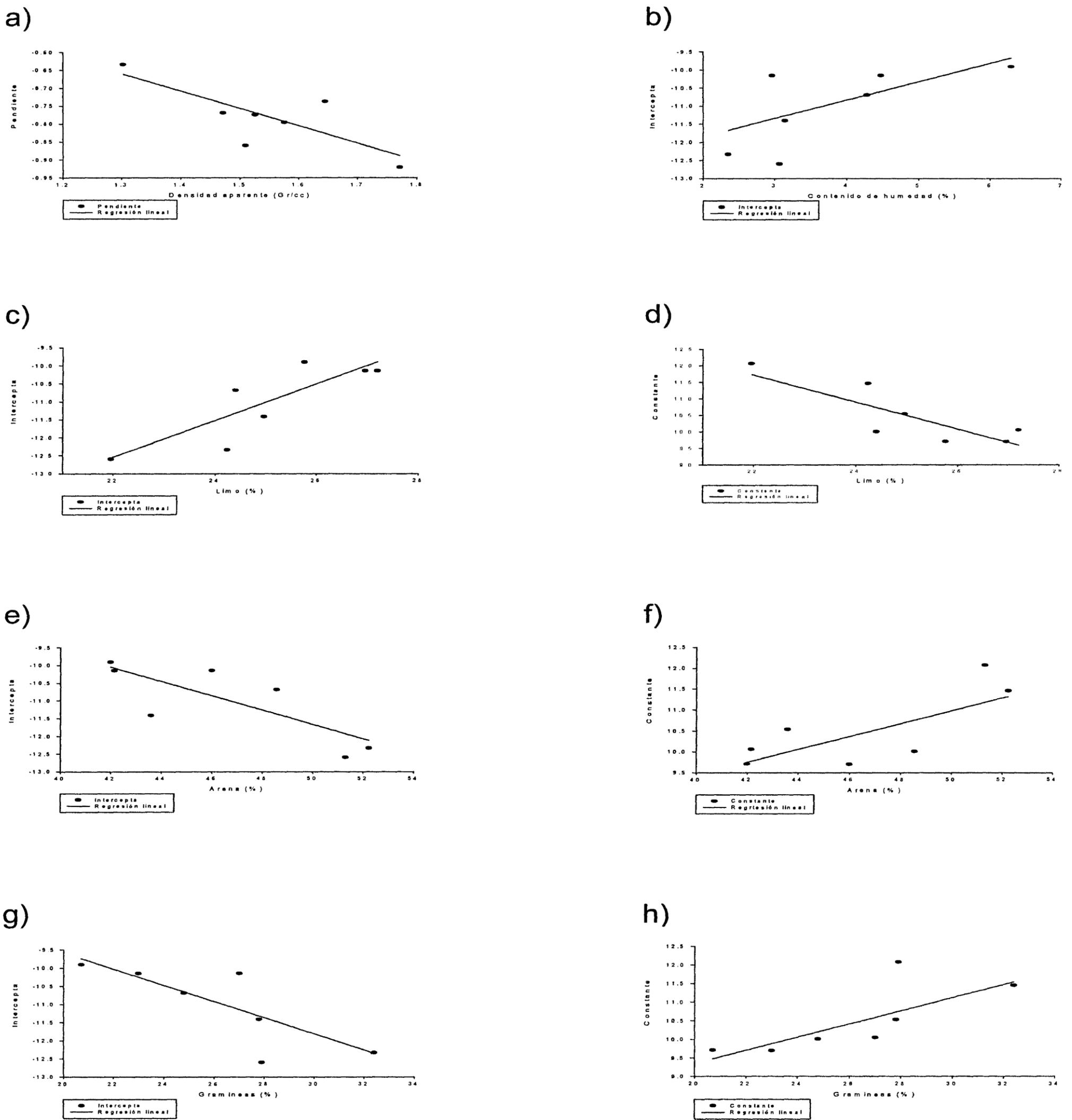


Figura 3. Parámetros de la ecuación para escurrimiento superficial (cm hr^{-1}) de las variables en las etapas de plantación con *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapalinamé.

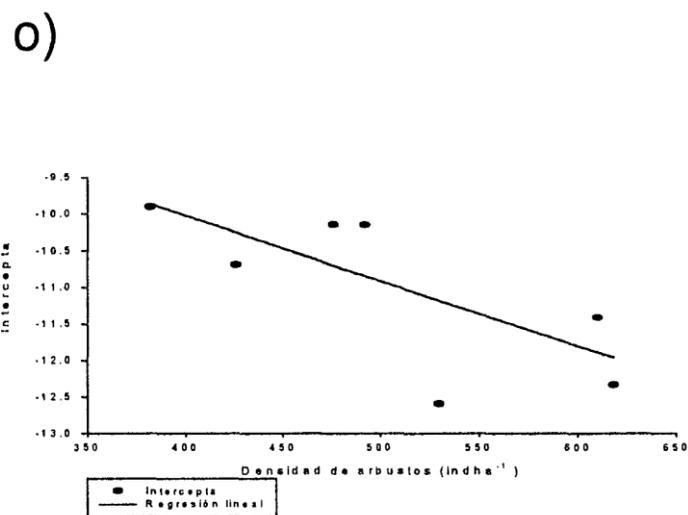
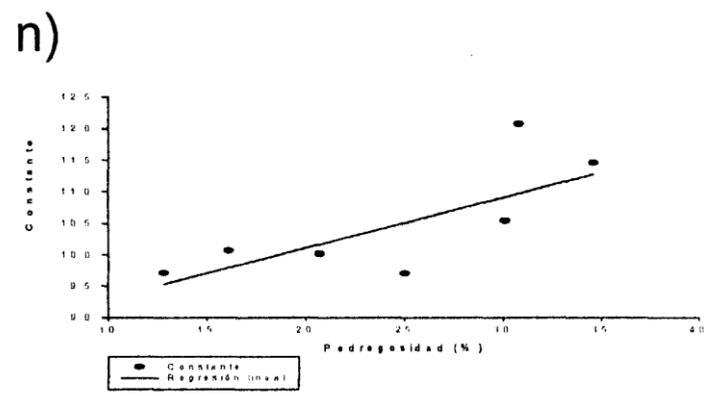
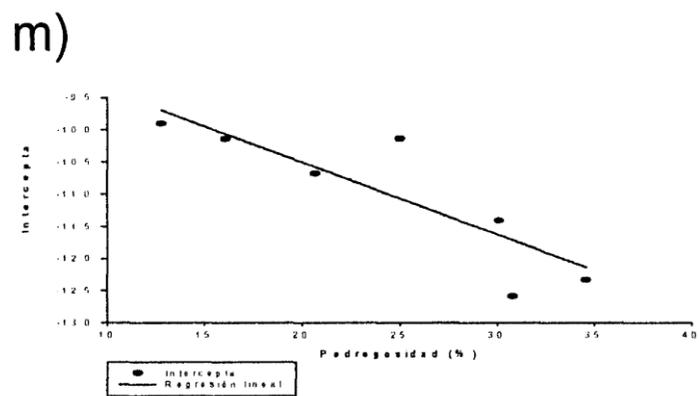
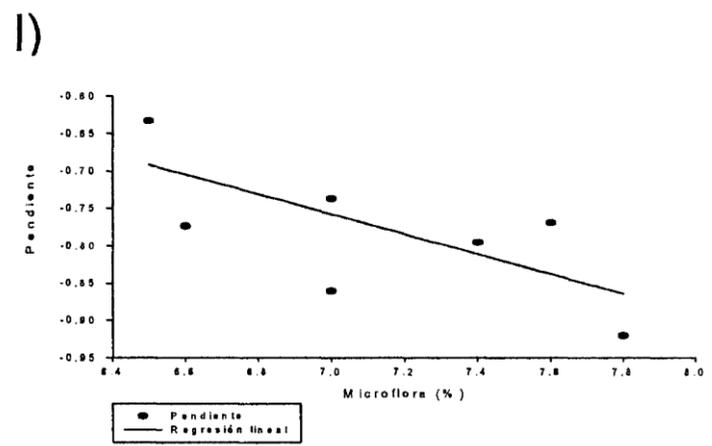
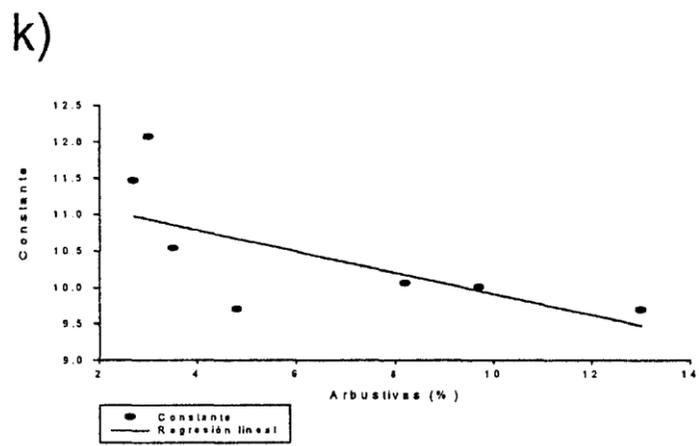
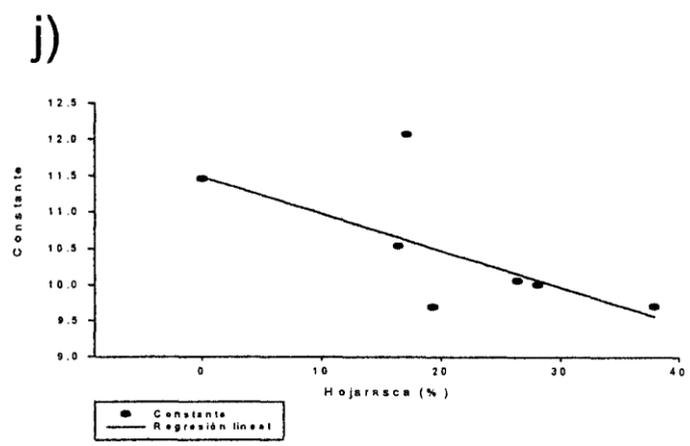
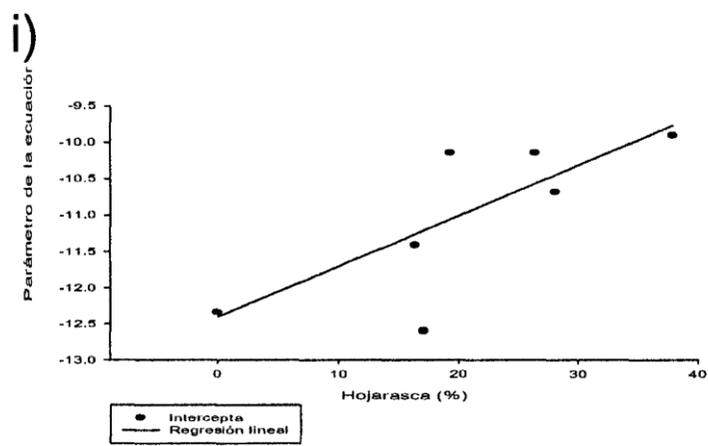


Figura 4. Parámetros de la ecuación para escurrimiento superficial (cm hr^{-1}) de las variables en las etapas de plantación con *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapalinamé. 7.1923

tendencia similar (cuadro 5). La infiltrabilidad inicia rápidamente después del primer intervalo (1 minuto) de haber iniciado la prueba, decae exponencialmente en tiempo y alcanza un estado casi constante a los 10 minutos de iniciadas las pruebas (cuadro 5; figura 5). Este comportamiento es indicativo de una rápida saturación del potencial matricial del suelo, característico de suelos con baja porosidad y baja conductividad hidráulica.

Los modelos de Kostiakov modificado ajustados a las tendencias de la infiltrabilidad son los más adecuados porque alcanzan un estadio constante, aunque un poco después de los tiempos marcados. A pesar de la poca fuente de datos que pudiera limitar el ajuste estadístico, no fue así. Los estadísticos de ajuste tuvieron coeficientes de determinación superiores al 80% y errores estándares menores que 1.4 cmhr^{-1} . Las ecuaciones ajustadas sirvieron para comparar las diferencias estadísticas entre plantaciones, además de resultar con buenos estadísticos de ajuste (cuadro 6; figura 6).

Los parámetros de las ecuaciones para infiltrabilidad se ajustaron adecuadamente al tiempo de la plantación. Las tendencias fueron lineales con parámetros estadísticamente significativos y con coeficientes de determinación por arriba del 83 % (figura 6). Estos hallazgos demuestran que la infiltrabilidad disminuye inicialmente en el área sin plantar y aumenta en las plantaciones de mayor edad. La pendiente de las ecuaciones parece estar en un estado constante. Sin embargo, el estado final de la infiltrabilidad aumenta con la edad de la plantación. El análisis muestra que las plantaciones de mayor edad promueven en mayor cantidad la tasa de la infiltrabilidad mientras que en el control se promueve la menor infiltrabilidad. Las características del suelo parcialmente explicaron este comportamiento en forma estadísticamente significativa (cuadro 7). La infiltrabilidad incrementa

Cuadro 5. Valores promedio ajustados de la infiltrabilidad (cm hr^{-1}) estimadas a intervalos de tiempo en las diferentes etapas reforestadas con *Pinus halepensis* Mill, en la Sierra Zapalinamé.

| Tiempo (minutos) | Etapa de plantación | | | | | | |
|---------------------|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 1961 | 1972a | 1972b | 1975 | 1976 | 1978 | Control |
| 1 | 15.8700 | 15.1162 | 15.5348 | 15.8700 | 15.8700 | 15.8700 | 15.87 |
| 3 | 12.8489 | 13.1486 | 11.3869 | 11.9576 | 13.8758 | 12.1816 | 13.1548 |
| 5 | 8.8679 | 11.5294 | 8.6777 | 6.3474 | 7.9980 | 8.3188 | 8.0286 |
| 8 | 8.3829 | 9.1005 | 6.4779 | 6.1292 | 7.1908 | 8.1448 | 5.9736 |
| 10 | 6.8371 | 7.4479 | 6.0649 | 5.9836 | 6.8443 | 6.6688 | 5.6754 |
| 15 | 6.3189 | 7.2722 | 6.0269 | 5.6198 | 5.9352 | 6.5863 | 5.3775 |
| 20 | 5.9366 | 7.0507 | 5.9861 | 5.2560 | 5.8191 | 6.5037 | 5.0062 |
| 25 | 5.9191 | 6.8293 | 5.9454 | 4.8922 | 5.6973 | 6.4212 | 4.8343 |
| 30 | 5.9015 | 6.6079 | 5.9047 | 4.5284 | 5.5754 | 6.3387 | 4.6625 |
| 35 | 5.8839 | 6.3864 | 5.8640 | 4.1646 | 5.4536 | 6.2561 | 4.5842 |
| 40 | 5.8663 | 6.1650 | 5.8132 | 3.8008 | 5.3318 | 6.1736 | 4.4124 |

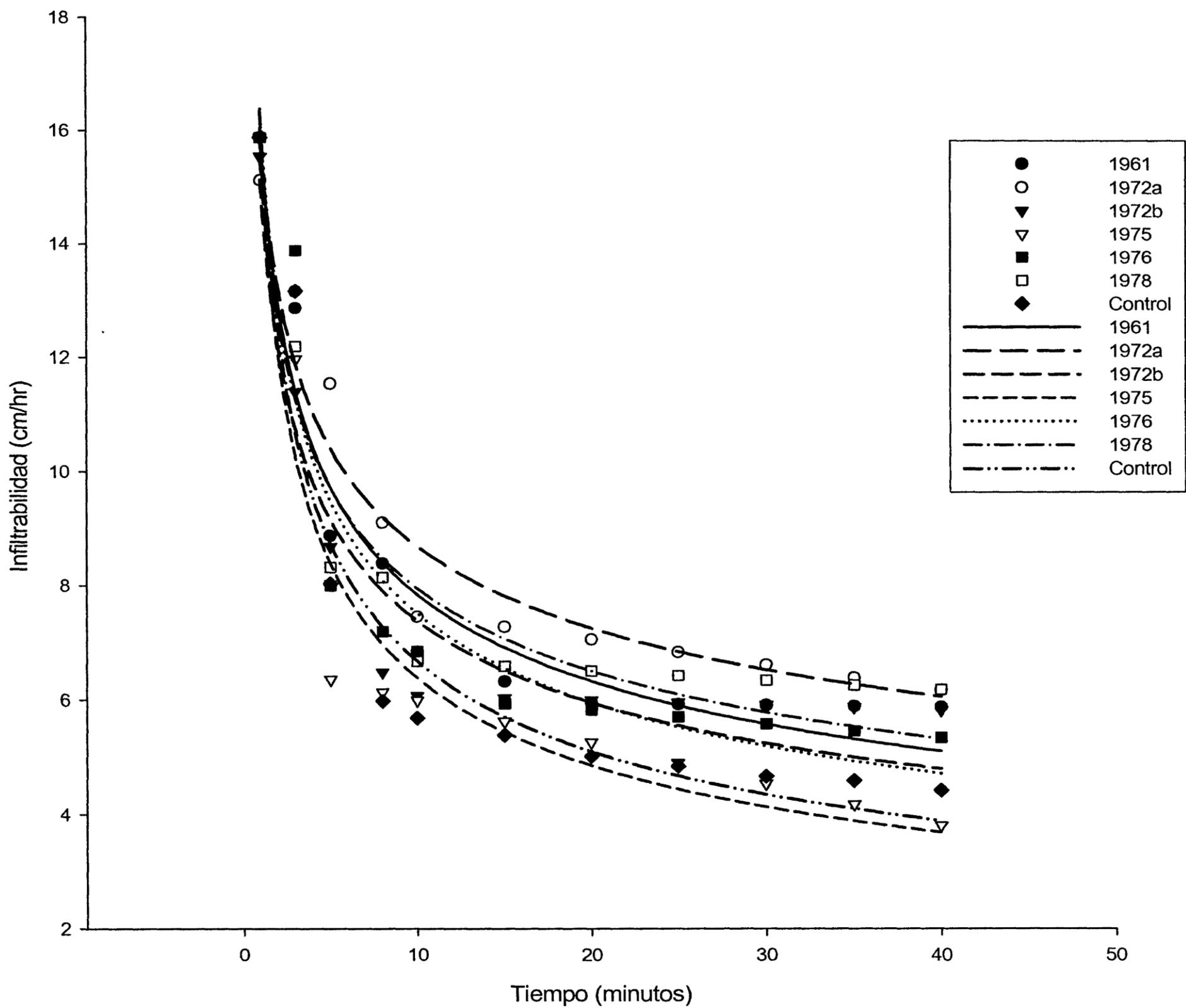


Figura 5. Modelos de Kostiakov modificado ajustados a la infiltrabilidad (cm hr⁻¹) de las diferentes plantaciones con *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapalinamé.

Cuadro 6. Parámetros de infiltrabilidad (cm hr^{-1}) de cada una de las etapas de plantación con *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapalinamé

| Etapas | a (Es) | b (Es) | ic | R² | Sx |
|---------------|-------------------|------------------|-----------|----------------------|-----------|
| 1961 | -10.6895 (1.0700) | -0.7957 (0.1123) | 10.004 | 0.8777 | 1.09654 |
| 1972a | -9.9077 (1.1377) | -0.6342 (0.968) | 9.705 | 0.9384 | 1.18849 |
| 1972b | -10.1532 (0.8546) | -0.9207 (0.1177) | 10.057 | 0.832 | 0.86793 |
| 1975 | -12.5989 (1.0104) | -0.7377(0.0811) | 12.069 | 0.8607 | 1.04144 |
| 1976 | -11.4134 (1.3556) | -0.7695 (0.1271) | 10.538 | 0.8561 | 1.04144 |
| 1978 | -10.1491 (0.8447) | -0.8605 (0.1047) | 9.696 | 0.8535 | 0.86116 |
| Control | -12.3386 (1.3244) | -0.7742 (0.1159) | 11.458 | 0.8688 | 1.36004 |

Etapas = año de plantación; a = intercepto; b = pendiente; (Es) = error estándar, ic = infiltrabilidad constante; R² = coeficiente de regresión., Sx = error estándar del model

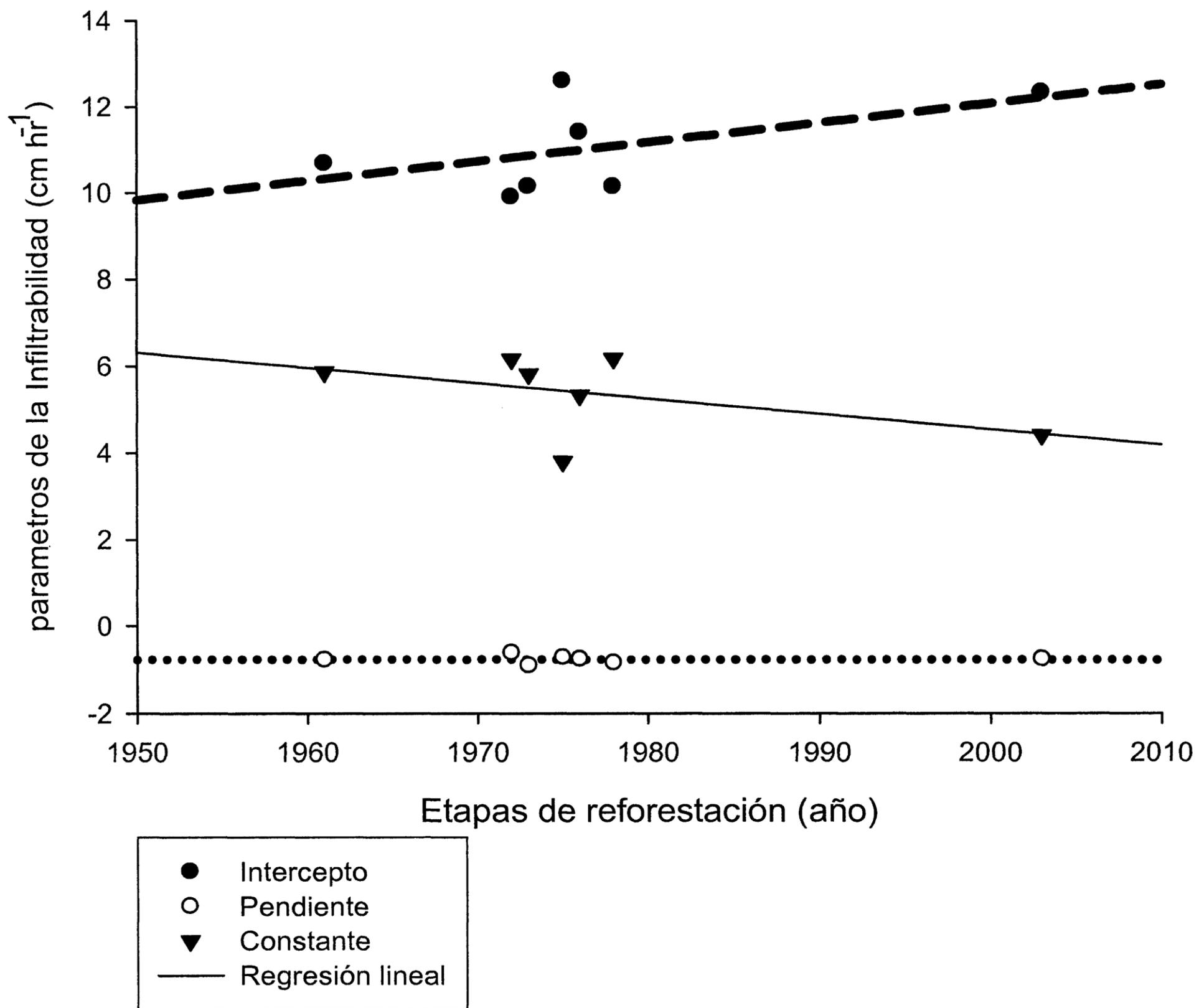


Figura 6. Parámetros de la ecuación de la infiltrabilidad (cm hr^{-1}) de cada una de las etapas de plantación con *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapalinamé.

Cuadro 7. Parámetros de la ecuación para infiltrabilidad (cm hr^{-1}) de las variables en las etapas de plantación con *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapalinamé

| Ecuación | R^2 | Sx | F | F P |
|-------------------------------------|--------|--------|---------|---------|
| a) $\beta = -0.0029 - 0.4858$ (Da) | 0.6290 | 0.0801 | 8.4792 | 0.0333 |
| b) $\alpha = 12.87 - 0.5092$ (CH) | 0.4506 | 0.0778 | 4.1017 | 0.0987 |
| c) $\alpha = 23.74 - 0.5087$ (LI) | 0.7006 | 0.0574 | 11.7048 | 0.0188 |
| d) $ic = -0.62 + 0.4584$ (LI) | 0.7853 | 0.1002 | 18.2924 | 0.0079 |
| e) $\alpha = 0.2022 + 1.558$ (AN) | 0.6242 | 0.0643 | 8.3064 | 0.0345 |
| f) $ic = 13.94 - 0.1866$ (AN) | 0.6572 | 0.1267 | 9.5874 | 0.0270 |
| g) $\alpha = 5.1310 + 0.2227$ (G) | 0.638 | 0.0631 | 8.8151 | 0.0312 |
| h) $ic = 10.1624 - 0.1891$ (G) | 0.486 | 0.1551 | 4.7285 | 0.0817 |
| i) $\alpha = 12.4000 - 0.0693$ (H) | 0.5871 | 0.0674 | 7.1099 | 0.0445 |
| j) $ic = 3.9220 + 0.2033$ (A) | 0.5637 | 0.1429 | 6.4624 | 0.05518 |
| k) $\beta = 0.1699 - 0.1326$ (MF) | 0.501 | 0.0929 | 5.0207 | 0.0751 |
| l) $\alpha = 8.2730 + 0.1118$ (P) | 0.7400 | 0.0535 | 14.2336 | 0.0130 |
| m) $ic = 7.6570 - 0.0995$ (P) | 0.6039 | 0.1361 | 7.6242 | 0.0398 |
| n) $\alpha = 6.4580 + 0.0089$ (Dar) | 0.5533 | 0.0701 | 6.1936 | 0.0552 |

β = pendiente, α = intercepta, ic = intensidad constante, Da= densidad aparente, CH = contenido de humedad, LI = limo, AN = arena, G = gramíneas, H = hojarasca, A = arbustivas, MF = microflora, P = pedregosidad, Dar = densidad de arbustos, R^2 = coeficiente de regresión, Sx = error estándar del modelo, F P = probabilidad

con el mayor contenido de limos y arenas. Es decir, la edad de la plantación parece modificar parcialmente las características del suelo haciendo a este un suelo con mayor presencia de espacios porosos permitiendo la penetración del agua al suelo.

Los parámetros de la vegetación que incidieron en el aumento de la infiltrabilidad en forma estadísticamente significativa fueron: las gramíneas, la cobertura de arbustivas, la pedregosidad, la densidad de arbustos, teniendo en cuenta que algunas de otras características biológicas del suelo asociadas estadísticamente no significativas como son: la hojarasca y la microflora, mejoran con el tiempo aumentando las tasas de infiltrabilidad (cuadro 7, figura 7 y 8).

3. Concentración de sedimentos.

En cuanto a los valores promedio de la concentración de sedimentos para diferentes intervalos de tiempo demuestran una tendencia similar entre plantaciones (cuadro 8). La concentración de sedimentos inicia después del primer minuto de haber iniciado la prueba y alcanzando un estado casi constante a los 8 minutos de cada evento teniendo un decremento con forma va pasando el tiempo. La etapa que obtuvo menor concentración de sedimentos fue la de 1976 con un estado final de 0.2718 (gr^{A}) y donde se encontró mayor concentración de sedimento fue en el área sin reforestar o control con un estado final de 1.4554 (gr^{A}).

En la figura 9 se puede apreciar la tendencia de cada una de las etapas de plantación, observando que en las plantaciones en general hay una disminución del proceso erosivo en comparación del área sin plantar.

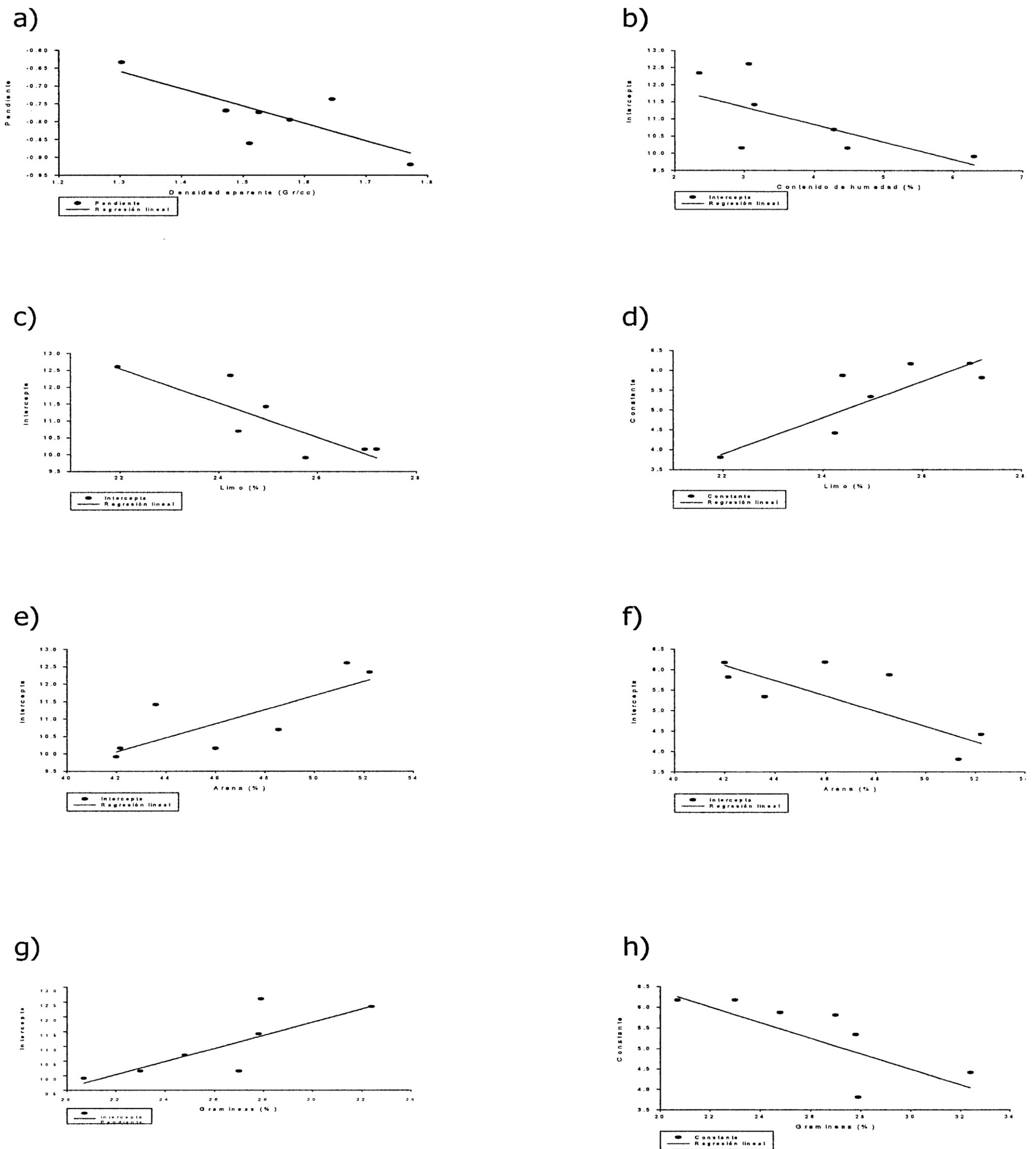


Figura 7. Parámetros de la ecuación para infiltrabilidad (cm hr^{-1}) de las variables en las etapas de plantación con *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapalinamé.

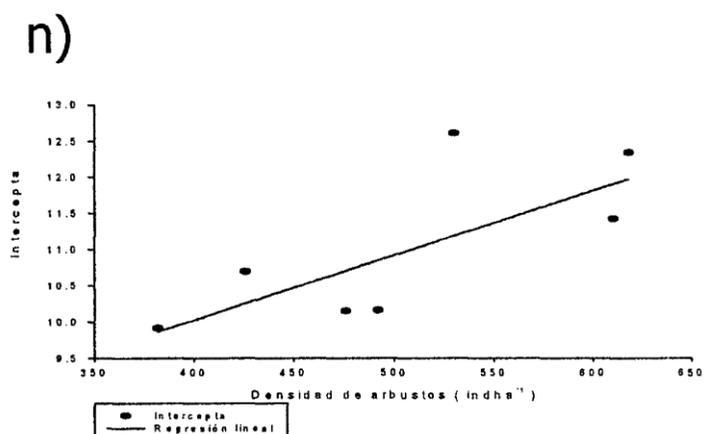
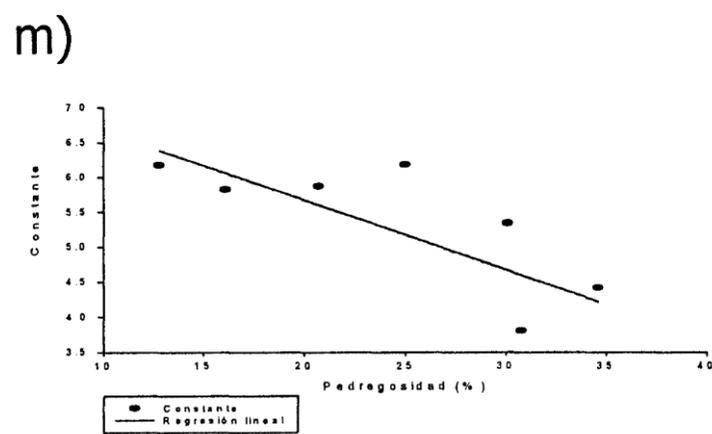
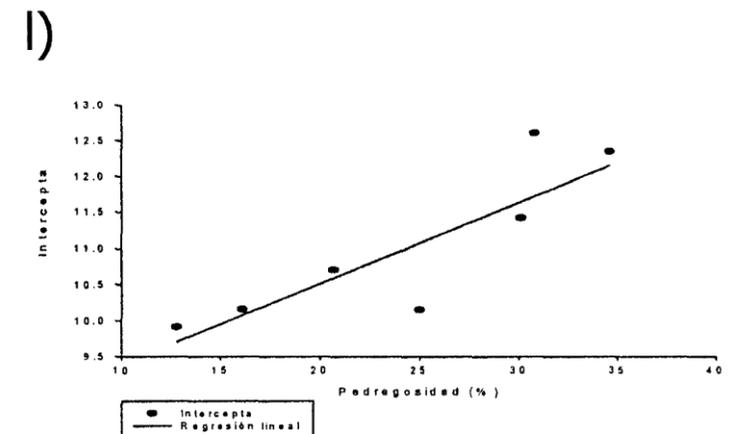
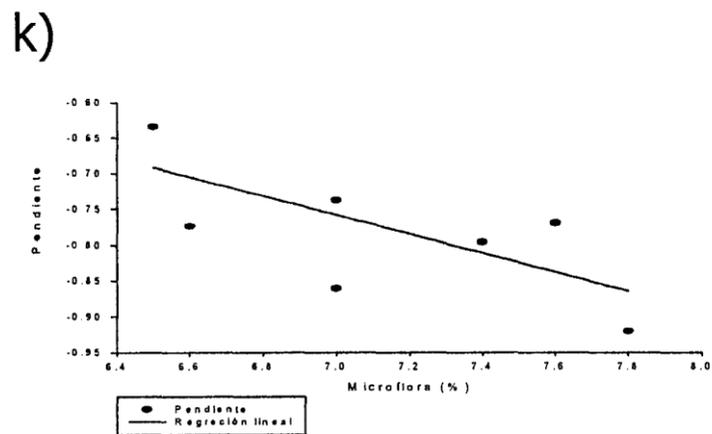
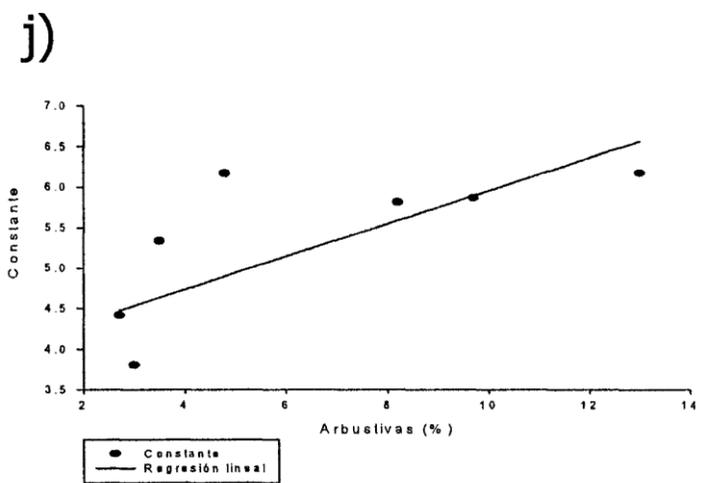
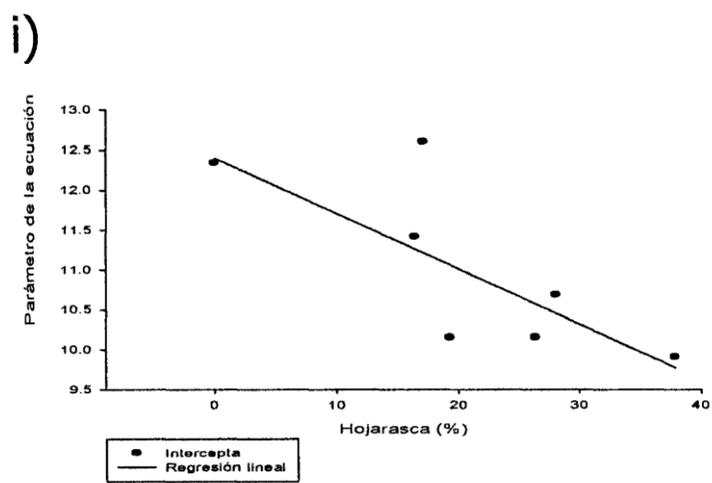


Figura 8. Parámetros de la ecuación para infiltrabilidad (cm hr^{-1}) de las variables en las etapas de plantación con *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapalinamé

Cuadro 8. Valores promedio de la Concentración de sedimentos (gr/l^1) estimada a intervalos de tiempo en las diferentes etapas reforestadas con *Pinus halepensis* Mill, en la Sierra Zapalinamé.

| Tiempo | Etapas de plantación | | | | | | |
|--------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| | 1961 | 1972a | 1972b | 1975 | 1976 | 1978 | Control |
| 3 | 0.8127 | 0.9322 | 0.6692 | 0.8218 | 0.3840 | 0.7156 | 2.4275 |
| 5 | 0.6409 | 0.9446 | 0.6287 | 0.6401 | 0.6292 | 0.7922 | 2.1704 |
| 8 | 0.6200 | 0.7265 | 0.5325 | 0.6573 | 0.7336 | 0.5566 | 1.7139 |
| 10 | 0.5359 | 0.7245 | 0.4765 | 0.6177 | 0.4560 | 0.5018 | 1.6383 |
| 15 | 0.5548 | 0.7196 | 0.4387 | 0.4956 | 0.3910 | 0.5388 | 1.6078 |
| 20 | 0.5169 | 0.6620 | 0.4222 | 0.4385 | 0.3647 | 0.4222 | 1.5773 |
| 25 | 0.4791 | 0.6996 | 0.4023 | 0.4087 | 0.3234 | 0.3672 | 1.5469 |
| 30 | 0.4413 | 0.5955 | 0.3824 | 0.4001 | 0.2862 | 0.3472 | 1.5164 |
| 35 | 0.4034 | 0.5490 | 0.3624 | 0.3916 | 0.2809 | 0.3366 | 1.4859 |
| 40 | 0.3656 | 0.5155 | 0.3425 | 0.3830 | 0.2718 | 0.3206 | 1.4554 |

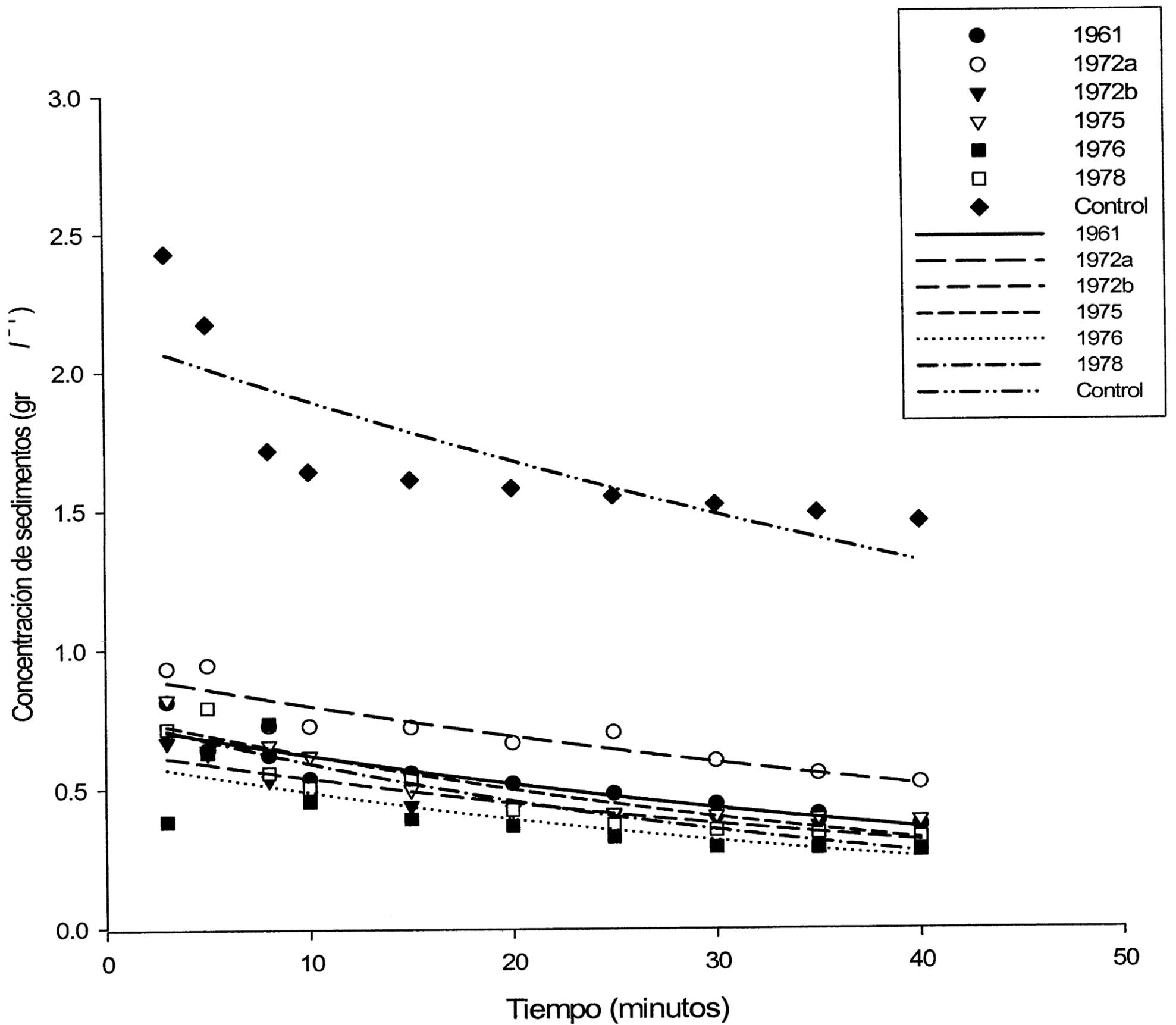


Figura 9. Valores promedio ajustados de la tasa de concentración de sedimentos (gr l⁻¹) de las diferentes plantaciones con *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapalinamé.

control. La tendencia en general es a incrementar los sedimentos conforme disminuye la edad de la plantación. Teniendo así que las plantaciones o las áreas con cobertura vegetal disminuyen o ayudan a disminuir los procesos erosivos, observando una mayor retención del suelo.

En el cuadro 9 se presentan los parámetros de las ecuaciones exponenciales desarrolladas para cada plantación. Los estadísticos de ajuste muestran en general varianzas explicadas por los modelos superiores al 80 %. Los errores estándares no son mayores que $0.20 \text{ gr}^{\text{A}}$. En la figura 9 se observan que estas tendencias se describen adecuadamente por los modelos, con la excepción del tratamiento control. Sin embargo, esta ecuación fue dejada para ser consistente con el análisis de covarianza.

En la figura 10 se observa la tendencia lineal que siguen los parámetros de las ecuaciones de sedimentación (gr^{1}) y las fechas de la plantación. Las relaciones positivas entre la intercepta, constante y la fecha de la plantación indican que existe mayor sedimentación en las plantaciones de menor edad o sin plantación, en contraste con las plantaciones de mayor edad, las cuales muestran las menores tasas de sedimentación. La pendiente no muestra diferencias estadísticamente significativas con la edad de la plantación.

En el cuadro 10 se presentan los parámetros de las ecuaciones lineales entre los parámetros de las ecuaciones y las características físico biológicas de los sitios. La sedimentación incrementa con el suelo desnudo, el área basal y la densidad de pinos en una forma estadísticamente significativa. A mayor cantidad de suelo desnudo una mayor pendiente en la sedimentación; a mayor densidad de pino una mayor cantidad inicial de sedimentos producidos y a mayor área basal una menor cantidad inicial de sedimentos producidos. Tal vez la densidad de pinos y el área basal estén ligados por

Cuadro 9. Parámetros de concentración de sedimentos (gr l^{-1}) de cada una de las etapas de plantación con *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapalinamé.

| Etapas | A (Es) | B (Es) | lc | R ² | Sx |
|---------|-----------------|-----------------|--------|----------------|--------|
| 1961 | 0.7435 (0.0361) | 0.0184 (0.0027) | 0.3656 | 0.86 | 0.0515 |
| 1972a | 0.9237 (0.0466) | 0.0149 (0.0024) | 0.5155 | 0.84 | 0.06 |
| 1972b | 0.6449 (0.0296) | 0.0184 (0.0025) | 0.3425 | 0.87 | 0.0423 |
| 1975 | 0.7745 (0.0415) | 0.0224 (0.0032) | 0.383 | 0.87 | 0.057 |
| 1976 | 0.7458 (0.0791) | 0.0314 (0.0064) | 0.2718 | 0.8 | 0.0784 |
| 1978 | 0.7663 (0.0482) | 0.0262 (0.0040) | 0.3206 | 0.87 | 0.0636 |
| Control | 2.139 (0.1368) | 0.0122 (0.0033) | 1.4554 | 0.63 | 0.2076 |

Etapas = año de plantación; a = intercepto; b = pendiente; (Es) = error estándar ic = constante; R² = coeficiente de regresión., Sx = error estándar del modelo

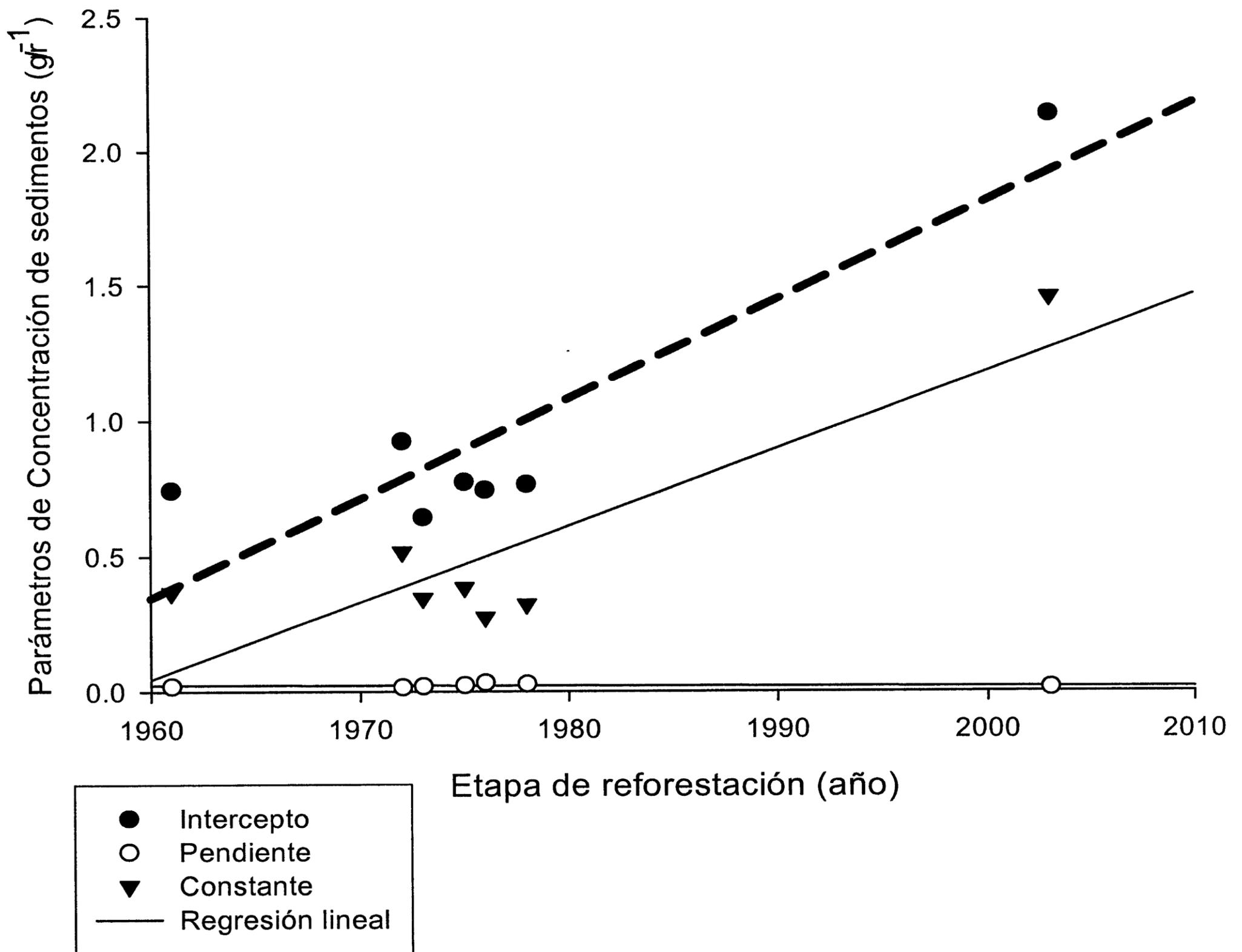


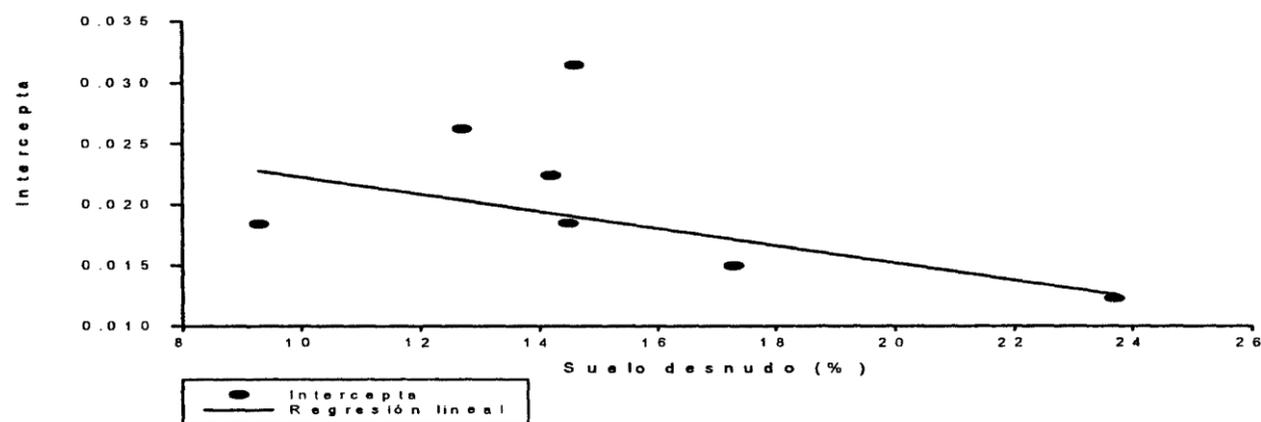
Figura 10. Parámetros de la ecuación de concentración de sedimentos ($gr\ l^{-1}$) de cada una de las etapas de plantación con *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapalinamé

Cuadro 10. Parámetros de la ecuación para concentración de sedimentos ($gr\ l^{-1}$) de las variables en las etapas de plantación con *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapalinamé

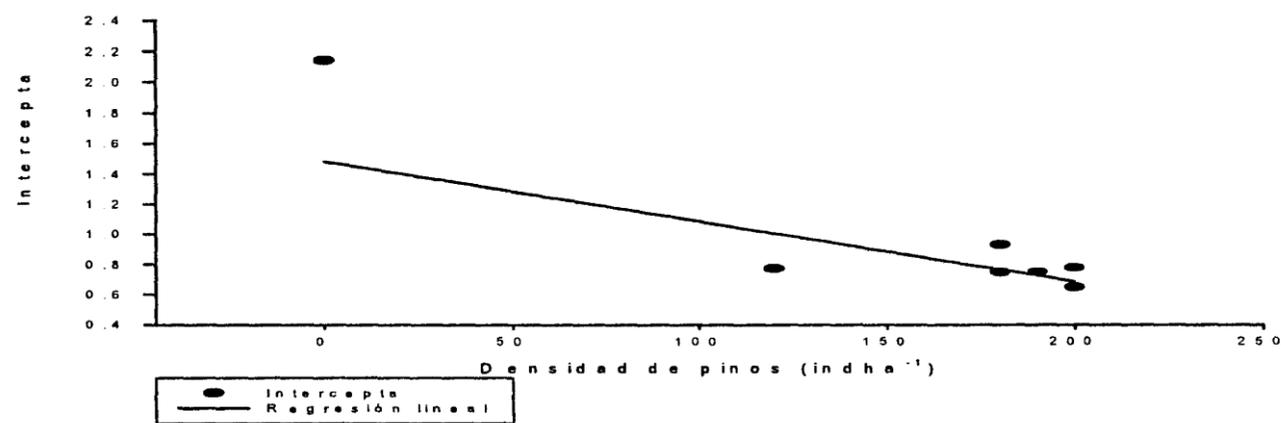
| Ecuación | R ² | Sx | F | F P |
|------------------------------------|----------------|--------|--------|--------|
| a) $\beta = 0.0293 - 0.0007 (SD)$ | 0.4693 | 0.2467 | 4.4226 | 0.0894 |
| b) $\alpha = 1.4830 + 0.0040 (Dp)$ | 0.4989 | 0.2185 | 4.9789 | 0.0760 |
| c) $\alpha = 1.5660 - 0.0280 (Ab)$ | 0.4736 | 0.2240 | 4.5025 | 0.0873 |

β = pendiente, α = intercepta, SD = suelo desnudo, Dp = densidad de pinos, Ab = área basal.

a)



b)



c)

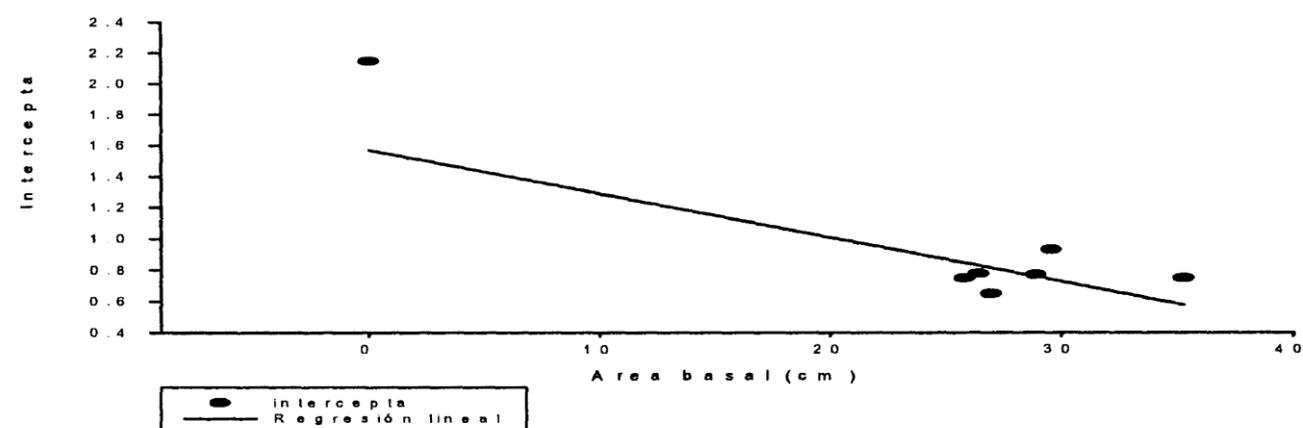


Figura 11. Parámetros de la ecuación para concentración de sedimentos de las variables en las etapas de plantación con *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapalinamé.

algún factor de diversidad que haga que estos parámetros no muestren tendencias consistentes (figura 11).

4. Erosión superficial.

En cuanto a los valores promedio de los diferentes intervalos de tiempo para la erosión superficial demuestran una tendencia similar entre plantaciones (cuadro 11). La concentración de sedimentos inicia después del primer minuto de haber iniciado la prueba y alcanzando un estado casi constante a los 10 minutos de cada evento teniendo una mayor pérdida de suelo en los primeros 15 minutos. La etapa que obtuvo menor erosión superficial fue la de 1978 con un estado final de 35.1365 (kg ha^{-1}) y donde se encontró mayor erosión superficial fue en el control o el área sin reforestar con un estado final de 122.9261 (kg ha^{-1}).

En la figura 12 se puede apreciar la tendencia de cada una de las etapas de plantación observando que en las plantaciones en general hay una reducción del proceso erosivo en comparación del área sin plantar o control. La tendencia de cada una de las edades de las plantaciones demuestra que las etapas de 1978 y 1972 obtuvieron una mayor retención al suelo seguido por la de 1961. Esto se debe al mejor enraizamiento del arbolado y a la vegetación asociada presente en el área que esta protegiendo al suelo.

Esto nos indica que las plantaciones o las áreas con cobertura vegetal disminuyen o ayudan a disminuir los procesos erosivos, observando una mayor retención del suelo.

Cuadro 11. Valores promedio ajustados de la erosión superficial (kg ha^{-1}) estimada a intervalos de tiempo en las diferentes etapas reforestadas con Pinus halepensis Mill, en la Sierra Zapalinamé.

| Tiempo | Etapas de plantación | | | | | | |
|--------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| | 1961 | 1972a | 1972b | 1975 | 1976 | 1978 | Control |
| 1 | 0.0001 | 8.0533 | 4.2806 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 |
| 3 | 41.0608 | 40.1394 | 39.7237 | 38.0103 | 18.1909 | 41.5175 | 81.7512 |
| 5 | 60.5411 | 81.4134 | 57.8428 | 75.0100 | 64.9665 | 71.2936 | 197.5450 |
| 8 | 65.9115 | 63.0456 | 71.4053 | 81.8170 | 64.9665 | 52.5811 | 205.3873 |
| 10 | 65.3776 | 60.8137 | 68.4047 | 72.1177 | 64.9665 | 53.0092 | 204.5681 |
| 15 | 70.5761 | 83.7668 | 64.1168 | 71.3291 | 48.6340 | 53.0092 | 165.4604 |
| 20 | 62.2401 | 83.7668 | 64.1168 | 74.3159 | 45.0388 | 53.0092 | 165.4604 |
| 25 | 58.0035 | 83.7668 | 64.1168 | 64.6783 | 45.0388 | 45.0515 | 150.4029 |
| 30 | 56.9479 | 67.1918 | 60.5481 | 63.2598 | 41.1941 | 40.4216 | 193.7044 |
| 35 | 56.9479 | 60.1325 | 60.8762 | 58.5783 | 41.1941 | 40.4216 | 197.7529 |
| 40 | 48.5943 | 49.6034 | 47.7835 | 53.6436 | 35.6040 | 35.1365 | 122.9261 |

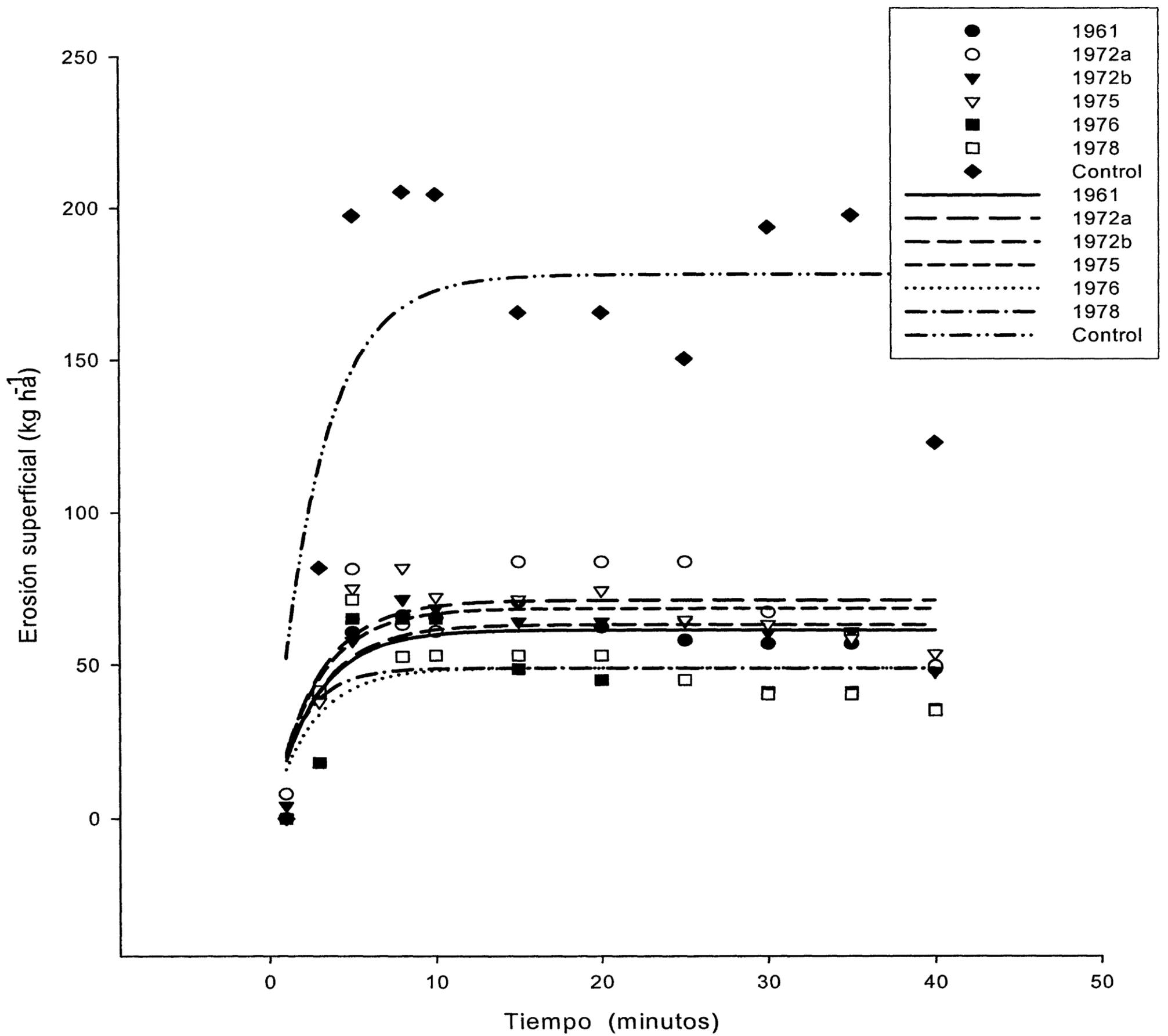


Figura 12. Valores promedio ajustados de la erosión superficial (Kg ha⁻¹) de las diferentes plantaciones con *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapalinamé

En el cuadro 12 se presentan los parámetros de las ecuaciones logarítmicas desarrolladas para cada plantación. Los estadísticos de ajuste muestran en general varianzas explicadas por los modelos superiores al 46 %. Los errores estándares no son mayores que 14.7 kg ha^{-1} . En la figura 13 se observan que estas tendencias que se describen adecuadamente por los modelos, con la excepción del tratamiento control. Sin embargo, esta ecuación fue dejada para ser consistente con el análisis de covarianza.

En la figura 13 se observa la tendencia lineal que siguen los parámetros de las ecuaciones de sedimentación en tiempo y las fechas de la plantación. Las relaciones positivas entre la intercepta, constante y la fecha de la plantación indican que existe mayor sedimentación en las plantaciones de menor edad o sin plantación, en contraste con las plantaciones de mayor edad, las cuales muestran las menores tasas de erosión superficial. La pendiente no muestra diferencias estadísticamente significativas con la edad de la plantación.

La erosión superficial no tuvo ninguna relación estadísticamente significativa con las variables estudiadas que fueron las características de suelo (cuadro 13), la cobertura vegetal (cuadro 14) y las características dasonómicas (cuadro 15). Esto no quiere decir que algunas de estas variables no influyan con nuestro proceso erosivo sino que probablemente el número de muestra no fueron las suficientes o el poco número de datos hacen no ajustan un buen modelo de correlación para la erosión superficial. (Branson *et al.*, 1981; Dunne y Leopold, 1978; Gutiérrez *et al.* 1993; FAO, 1967).

Cuadro 12. Parámetros de la erosión superficial (kg ha^{-1}) de cada una de las etapas de plantación de estudio con *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapalinamé.

| Etapas | A (Es) | B (Es) | ic | R ² | Sx |
|---------|---------------|-----------------|----------|----------------|---------|
| 1961 | 60.92 (3.759) | 0.3662 (0.1233) | 48.59 | 0.74 | 9.6122 |
| 1972a | 68.92 (5.042) | 0.3795 (0.1467) | 49.6034 | 0.67 | 14.4858 |
| 1972b | 62.71 (3.332) | 0.3585 (0.1039) | 47.7835 | 0.81 | 8.7499 |
| 1975 | 68.48 (4.94) | 0.364 (0.1471) | 53.6436 | 0.71 | 13.0307 |
| 1976 | 49.33 (6.087) | 0.4054 (0.2756) | 35.604 | 0.46 | 14.7898 |
| 1978 | 47.91 (4.555) | 0.5458 (0.3204) | 35.1365 | 0.51 | 12.9083 |
| Control | 177.3 (15.09) | 0.3472 (0.1584) | 122.9261 | 0.66 | 38.9616 |

Etapas = año de plantación, A = intercepta B = pendiente, (ES) = error estándar, ic = constante, R² = coeficiente de regresión, Sx = error estándar del modelo

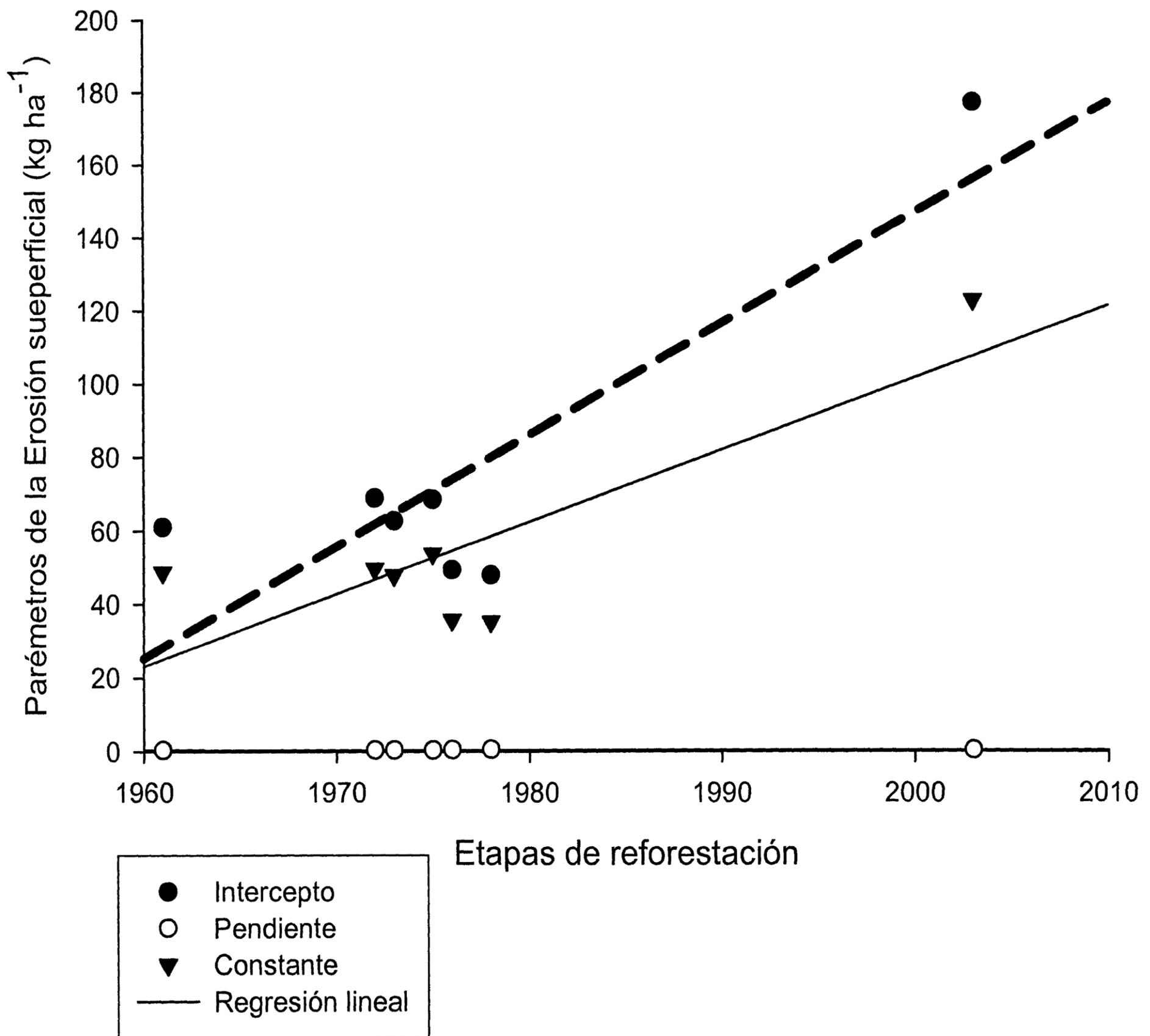


Figura 13. Parámetros de la ecuación de la erosión superficial (kg ha^{-1}) de cada una de las etapas de plantación con *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapalinamé.

Cuadro 13. Valores promedio de las características del suelo en los sitios de estudio en la Reforestación Zapalinamé.

| Etapas | C.H. (%) | Da (gcm ⁻³) | Pr (cm) | TS (°f) | TA (°f) | Textura (%) | | | | M.O (%) | Terreno | |
|---------|-------------|----------------------------|------------|------------|------------|-------------|------|------|-----|------------|---------|------|
| | | | | | | LI | AR | AN | CT | | Pd | M |
| 1961 | 4.28 | 1.576 | 32.6 | 65 | 67 | 24.4 | 27 | 48.6 | MAA | 4.97 | 1.8 | 1830 |
| 1972a | 6.3 | 1.303 | 19.4 | 66 | 68 | 25.8 | 32.2 | 42 | MAA | 5.42 | 1.8 | 1920 |
| 1972b | 2.97 | 1.772 | 17.6 | 62 | 65 | 27.2 | 30.6 | 42.2 | MAA | 5.8 | 2.4 | 1920 |
| 1975 | 3.07 | 1.645 | 12.22 | 69 | 67 | 22 | 26.1 | 51.3 | MAA | 5.22 | 1.7 | 1930 |
| 1976 | 3.15 | 1.472 | 29 | 73 | 76 | 25 | 31.4 | 43.6 | MAR | 4.97 | 1.7 | 1940 |
| 1978 | 4.47 | 1.51 | 15 | 66 | 68 | 27 | 27 | 46 | MAA | 5.85 | 2.2 | 1978 |
| Control | 2.35 | 1.526 | 17.4 | 78 | <u>75</u> | 24.2 | 23.5 | 52.2 | MAA | 5.38 | 2.1 | 1945 |

Etapas = Año que fue plantada, CH = Contenido de humedad, DA = Densidad Aparente Pr = Profundidad del suelo, TS = Temperatura del Suelo, TA = Temperatura del Agua LI= Limo, AR = Arcilla, AN = Arena, CT = Clase Textura, M.O = Materia Orgánica, Pd = Pendiente, M = Metros Sobre el Nivel del Mar.

Cuadro 14. Valores promedio de las características de la cubierta vegetal en las diferentes etapas reforestadas con *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapalinamé.

| Etapas | Cobertura del Suelo (%) | | | | | | Peso seco de biomasa (gr) | | | |
|---------|-------------------------|------|-----|-----|------|------|---------------------------|-------|------|-------|
| | G | H | A | MF | SD | P | G | H | A | T |
| 1961 | 24.8 | 28.1 | 9.7 | 7.4 | 9.3 | 20.7 | 46.02 | 31.34 | 0 | 77.36 |
| 1972a | 20.7 | 37.9 | 4.8 | 6.5 | 17.3 | 12.8 | 7.18 | 53.26 | 7.68 | 68.12 |
| 1972b | 27 | 26.4 | 8.2 | 7.8 | 14.5 | 16.1 | 87.26 | 88.78 | 0 | 176 |
| 1975 | 27.9 | 17.1 | 3 | 7 | 14.2 | 30.8 | 49.88 | 34.16 | 0 | 84.04 |
| 1976 | 27.8 | 16.4 | 3.5 | 7.6 | 14.6 | 30.1 | 58.24 | 67.88 | 11.2 | 137.3 |
| 1978 | 23 | 19.3 | 13 | 7 | 12.7 | 25 | 36.9 | 37.44 | 6.14 | 80.48 |
| Control | 32.4 | 0 | 2.7 | 6.6 | 23.7 | 34.6 | 49.04 | 0 | 14.6 | 63.64 |

Etapas = Año que fue plantada, G = gramíneas, H = hojarasca, A = arbustiva, MF = microflora, SD = suelo desnudo, P = pedregosidad, T = total.

Cuadro 15. Valores promedio de las características dasonómicas en las diferentes etapas reforestadas con *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapalinamé.

| Etapas | Dar (indha ⁻¹) | Dp (indha ⁻¹) | Ab (cm) | DN (cm) |
|-------------------|-------------------------------|------------------------------|------------|------------|
| 1961 | 426 | 180 | 35.31 | 14.90 |
| 1972 ^a | 382 | 180 | 29.56 | 10.34 |
| 1972b | 492 | 200 | 26.94 | 7.05 |
| 1975 | 530 | 200 | 26.38 | 9.56 |
| 1976 | 610 | 190 | 25.81 | 9.27 |
| 1978 | 476 | 120 | 28.89 | 12.27 |
| Control | 618 | | | |

Dar = densidad de arbustos, Dp = densidad de pinos, Ab = área basal, DN = diámetro normal

CONCLUSIONES

De acuerdo a las observaciones llevadas a cabo, y a los análisis estadísticos realizados, se puede llegar a las siguientes conclusiones;

1. - El escurrimiento superficial, la infiltrabilidad, la concentración de sedimentos y la erosión superficial en las 5 etapas de plantación mostraron diferencias significativas.
2. – La plantación de *Pinus halepensis* llevada a cabo en terrenos de la UAAAN ha incrementado la infiltrabilidad del suelo y también reduce los procesos erosivos.
3. - El incremento de la tasa de infiltrabilidad presentó relación positiva con la edad de la plantación
4. –La infiltrabilidad en las áreas reforestadas presentaron mayores valores que el control a cualquier intervalo de tiempo.
5. – El sitio donde se estima el escurrimiento superficial, la infiltrabilidad, la concentración de sedimentos y la pérdida de suelo dentro de un área reforestada, definen el grado de eficiencia de la misma.
6. – Las características del suelo, vegetación, del terreno y las variables dasométricas que mayor influencia tienen sobre la infiltrabilidad, el escurrimiento, la concentración de sedimentos y la erosión superficial del suelo son el contenido de humedad inicial del suelo, la pendiente del terreno, la cubierta del suelo por hojarasca, gramíneas, arbustivas y el área basal y el número de individuos por hectárea, respectivamente.

RESUMEN

El incremento en la desertificación causada por el aprovechamiento excesivo de los recursos naturales, se ha transformado en un grave problema. En las regiones áridas del norte de México la tala inmoderada, los incendios, el sobrepastoreo, así como las sequías, han causado que la cubierta del suelo disminuya considerablemente, provocando la reducción de la infiltración y un incremento tanto de los escurrimientos superficiales, como de la producción de sedimentos y la erosión superficial.

Por lo tanto la falta de vegetación, que influenciaban las condiciones hidrológicas y la necesaria restauración forestal en la Sierra Zapalinamé, Coahuila. Méx. En lo cual en épocas pasadas estuvo en su totalidad cubierta por bosque de *Pinus cembroides* Zucc. Principalmente y en 1960 se implementó un plan de reforestación con diferentes etapas de plantación, debido a que sus mantos acuíferos son una fuente importante de abastecimiento de agua para la región urbana de Saltillo, Coahuila. México.

Por esto las plantaciones forestales han marcado una pauta en la rehabilitación de las áreas degradadas; por otro lado, en la mayoría de las plantaciones que se han llevado a cabo en el país se menciona que tienen efectos benéficos en los procesos hidrológicos sin llegar a mencionar la magnitud de dichos efectos. Debido a la poca información y trabajos realizados este trabajo proporciona bases para hablar de la utilización de las plantaciones forestales para interferir en los procesos hídricos de infiltración y los procesos erosivos.

En el presente trabajo se escogieron 5 etapas de plantación con diferentes edades y un control donde no se a plantado, evaluando la infiltrabilidad, el escurrimiento superficial, la concentración de sedimentos y la erosión

superficial. Mediante la simulación de lluvia llevada a cabo con un simulador de lluvia de boquilla descrito por Wilcox et al., (1986). Utilizando parcelas de 1m, delimitadas por un aro metálico enterrado en el suelo a 5 cm en seguida se monto el simulador a una altura de 154 cm del suelo a la boquilla, un ves instalado el simulador de lluvia se regulo y se regulo y aplico una intensidad de lluvia de 15.87 cm hr^{-1} . El evento de simulación duro 40 minutos con intervalos de tiempo de 1,3,5,8,10,15,20,25,30,35,40.

Después de cada evento de simulación se colecto una muestra de suelo para analizar sus características físicas y químicas como también un muestreo en línea de puntos de contactos para la cobertura vegetal presente en el área como es gramínea, arbustiva, herbáceas, hojarasca, etc. y determinar sus características dasonómicas influenciadas en los procesos hidrológicas y erosivos.

Los resultados arrojados del presente trabajo demuestran estadísticamente que a mayor edad de plantación aumenta la infiltración disminuyendo los procesos erosivos

Relacionado en mayor proporción a las características físicas y químicas del suelo seguido por las características dasonómicas del arbolado como es el área basal disminuyendo la perdida de suelo en mayor cantidad.

Por lo tanto las plantaciones es la manera de rehabilitar las áreas degradadas en el mundo como también aumentar la recarga de los mantos acuíferos y la protección del suelo disminuyendo los procesos erosivos.

LITERATURA CITADA

- Anderson, D.A. and W. Smith. 1970. Forest and forestry. The Intertate Printers and Publichers Inc., U: S. A.
- Benítez, A. 1972. Captación de agua subterránea. Editorial Dossat, 2ª Edición. Madrid, España, 145 p.
- Buckhouse, J. C. and G. F. Gifford. 1976. Sediment.production and infiltration rates as affected by grazing and debris burning on chained and seeded pinyon –juniper. J. Range Manage. 29. 83-85.
- Branson, F. A., Gifford, K. G. Renard, and R. F. Hadley. 1981. Rangeland hydrology. 2a ed. A publications of the Society for Rangement. Kendall/Hunt Publishing Company. Dubeque USA. 340 p.
- Caballero, D. M., 1990. El bosque como sistema de producción de agua. División De ciencias forestales, UACH. Primera edición 1993. Chapingo México. 130 p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 1994. Manual para evaluar Recursos hidráulicos subterráneos. Impresos por hidrolegro, S. C. México, D. F. 243 p
- Custodio, E. y Ramón, LL, M. 1976. Hidrológica subterránea. Ediciones Omega. Primera Edición, Tomo I. Barcelona España. 1136 p.
- De luna, R. M., 1989 Influencia de las edades de la reforestación Zapalinamé sobré la infiltración y la producción de sedimentos. Tesis de licenciatura. UAAAN: Saltillo, Coah., México. 64 p.
- Dunne, T. and L.B. Leopold. 1978. Water in Environmental Planning. W. H. Freeman and Company. San Francisco. U. S. A. 818p.
- Dueñez, A. J. 1993, impacto del uso múltiple sobre la infiltrabilidad y la erosión en la cuneca paso de piedra Durango. UAAAN, Tesis maestría. Saltillo, Coahuila. México. 94 p.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen. Instituto de Geografía. UNAM. México, D. F. 246 p.

- Gifford, G. F., G. Williams and G. B. Coltharp. 1970. Infiltration and erosion studies on pinyon – juniper conversion sites in south Utah. *J. Range Manage.* 23:402 – 406.
- Goor, A. Y. 1964. Métodos de plantación forestal en zonas áridas. Cuaderno de fomento Forestal No 16 FAO. Roma, Italia.
- Gutiérrez C. J. y A. Dueñez 1998, relación de tasas de infiltración-edad de la plantación en la zona reforestada Zapalinamé. *Revista agraria. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro* 158-199. Saltillo, Coahuila México.
- Gutiérrez C. J. y M. A. Salazar C. 1986. Impacto de la reforestación Zapalinamé sobre las tasas de infiltración. *Revista Agraria. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro*: 286-302. Saltillo, Coahuila, México.
- Gutiérrez C., J., F. M. Smith y J. G. Medina T. 1979. Caracterización hidrológica de la cuenca San Tiburcio, Zacatecas. Saltillo, México. UAAAN. Monogr. Técnico Científico
- Gutiérrez C., j., M. Zapien B., J. G. Medina T. y J. A. De la cruz C. 1978. Establecimiento de especies forestales en zonas áridas. UAAAN. Monog. Técnico-Científica.
- Hillel, D. 1971. *Soil and Water. Physical principals and processes.* Academic press, Inc. Orlando, Florida 32887 United Kingdom Edition Published by Academic press, Inc. (London) LTD. 153 p.
- Hillel, D. 1982. *Introduction to soil Physical.* ISBN 0-12-348520 7. Harcourt brace Jovanovich, publishers. 217p.
- Horton, R. E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Am. Geophys Union Trans.* 14:446-460.
- Hewlett, P. A. 1970. *Texto Guía Forestal.* Departamento de divulgación forestal y de la fauna. SAG. México.
- Johnson, M. G. and R. L. Beshta. 1980. Logging, infiltration capacity and surface erodability in western Oregon. *J. Forestry.* 78:334-337
- Johnson, w. M. 1940. Infiltration capacity of forest soils as influenced by litter. *J. Forestry.* 38:520-522.

- Kirkby, M. J. y R. P. Morgan. 1984. Erosión de los suelos. Ed. Limusa. México. 375 p.
- Kramer, P. J. 1969. Plant and soil water relationships. A moderns síntesis. McGraw-hill Series in Organismic Biology McGraw-Hill book Company. New Cork, N. Y., U. S. A. 482 p.
- Mendoza H, J. M. 1983. Diagnostico climático para la zona de influencia inmediata de la UAAAN. Depto de Agrometeorología, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, México. 616 p.
- More, E., E. Jones, F. Kinsinger, R. Pinhey and J. Sainsburry. 1979. livestock grazing management and water quality protection (State of the art reference document) EPA 91019 – 79 – 67. Denver, Co., USA. U. S. Bureau of Land Manage. 147 p.
- Oviedo R., J. L. 1980 Inventario de las alternativas de transformación de especies forestales de la Sierra de Zapalinamé. Tesis profesional. Saltillo, México. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 88p.
- Rodríguez T; F., 1981. Elementos del escurrimiento superficial. Potena A. C. Chapingo México. 225 p.
- Spurr., S. H. y Barnes, B. V. 1982. Ecología Forestal. AGT. Editor, S. A. Impresora Azteca. México, D. F. 92 p.
- Stanley N. D., 1971. Hidrogeología. Ariel Barcelona España. 85 p
- Wilcox, B. P., M. K. Wood and J. M. Tromble. 1986. Factors influencing infiltrability of semiarid mountain slopes. J. Range Mange. 206p.
- Wilsler, C. O. and Brater, E. F. 1959. Hydrology Library of Congress Catalog Card Number: 59 – 149L. Second Edition. University of Michigan. Printed in the United States of America. 408 p.
- Wagner, H. W. y Lenz, H. (1989). El Bosque y la Conservación del Suelo. Editorial Purrua. Cuarta Edición. México, D. F. 189 p.
- Rodríguez, T. F. (1981). Elementos del escurrimiento superficial, Patena A. C. Chapingo, México, 225p