

USO DE CENIZAS DE INCINERACIÓN DE LODOS DE DEPURADORAS



Comunidad Europea



© **Edita:** JUNTA DE ANDALUCÍA. Consejería de Agricultura y Pesca

Publica: Dirección General de Investigación y Formación Agraria
Servicio de Publicaciones y Divulgación

Autores: Rafael Enrique Hidalgo Fernández
Juan Vicente Giráldez Cervera
Jesús Ayuso Muñoz

Fotografías e Ilustraciones: Autores

Depósito Legal: SE-2694-97

I.S.B.N.: 84-89802-22-X

Maquetación e Impresión: A. G. Novograf, S. A. (Sevilla)

USO DE CENIZAS DE INCINERACIÓN DE LODOS DE DEPURADORAS.

**APLICACIÓN DE LAS CENIZAS
PRODUCIDAS EN LA ESTACIÓN
DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES
(E.D.A.R.) DE CÓRDOBA**

RAFAEL ENRIQUE HIDALGO FERNÁNDEZ
Dpto. de Ingeniería Rural, Universidad de Almería

JUAN VICENTE GIRÁLDEZ CERVERA
Dpto. de Agronomía, Universidad de Córdoba

JESÚS AYUSO MUÑOZ
Dpto. de Ingeniería Rural, Universidad de Córdoba

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	5
II. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LAS CENIZAS	9
III. APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	17
3.1. Introducción	19
3.2. Efecto de la adición de cenizas sobre la resistencia a compresión	20
3.3. Efecto de la adición de cenizas sobre la densidad aparente y la humedad	22
3.4. Efecto de la adición de cenizas sobre la succión	24
3.5. Efecto de la adición de cenizas sobre la absorción	25
3.6. Efecto de las cenizas sobre la resistencia a la intérprete. (Heladicidad)	26
3.7. Efecto de la adición de cenizas sobre la eflorescencia	27
IV. APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS COMO ENMENDANTE AGRÍCOLA	29
4.1. Introducción	31
4.2. Efecto de la adición de cenizas sobre las propiedades mecánicas del suelo	32
4.3. Efecto de la adición de cenizas sobre las curvas de retención de humedad	41
V. CONCLUSIONES	45

I. INTRODUCCIÓN

I. INTRODUCCIÓN.

Una de las servidumbres de nuestra civilización, es la recogida y aprovechamiento de residuos, producidos en los núcleos que se concentra la población.

En cualquier actividad de producción o transformación, se generan residuos. Una empresa limpia, es aquella que no genera residuos, desde que la materia prima entra en la planta, hasta que sale el producto principal para la que fue concebida, siendo los subproductos, reusables por la misma empresa, o por otras. De este modo, se consigue un doble beneficio, reducir la carga contaminante, contribuyendo a mantener el ambiente para futuras generaciones, y aprovechar más eficientemente la energía, al seguir utilizando el residuo dentro de la cadena energética.

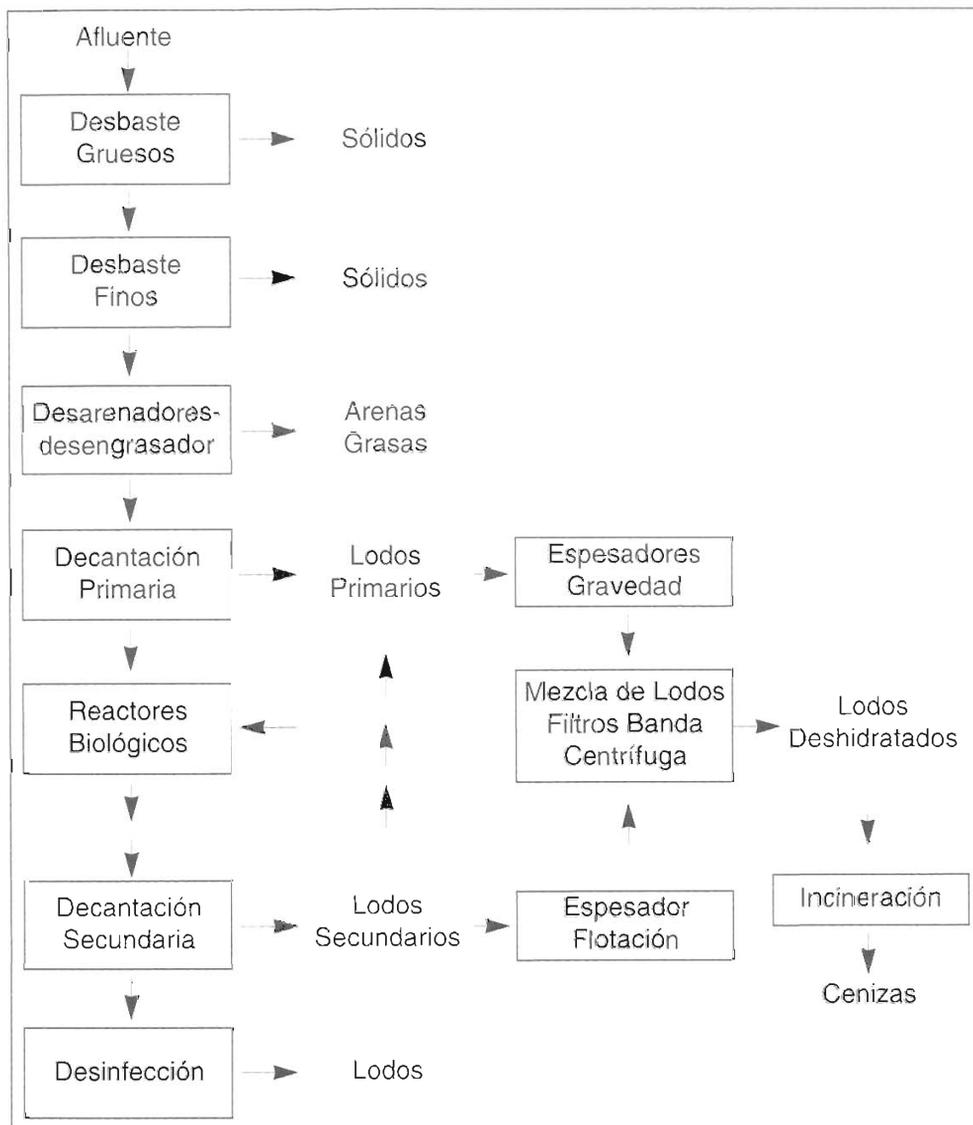
El nivel productivo de un país, está directamente relacionado con el volumen de residuos que genera. Por ello uno de los retos a los que la sociedad se enfrenta, es su eliminación racional. La Unión Europea, promueve el desarrollo de nuevos productos y tecnologías limpias, recayendo sobre el productor la responsabilidad de su eliminación.

En el proceso de depuración de aguas residuales, se genera como subproducto un fango o lodo. En algunas plantas se destina a otros usos, pero en el caso de la estación depuradora de aguas residuales de Córdoba, se optó, por la incineración en un horno de lecho fluidizado. Esta solución reduce a la tercera parte el volumen de los residuos generados, dejando un residuo más manejable, aunque no resuelve completamente el problema. En principio las cenizas eran depositadas en el vertedero municipal sin uso posterior.

En el esquema 1, se representa el tratamiento que la empresa municipal de aguas de Córdoba da, a las aguas residuales de la ciudad.

El primer paso, para evaluar el destino final de los lodos, es determinar su cantidad y características, así como el grado de variabilidad de las mismas. La composición de un fango, limita su posible uso.

La producción de fango, se estima en 50 gramos por habitante y día. La estación depuradora de aguas residuales de Córdoba, trata diariamente entre 80 y 85 m³ de aguas residuales, obteniéndose 100 tn de lodo líquido, 30 tn de materia seca, que quedan reducidos a 33 tn de cenizas con un 50% de humedad. Esto supone un volumen anual de vertedero superior a doce mil metros cúbicos. Además del llenado rápido del vertedero, el alto porcentaje de humedad, entorpece su manejo, y provoca la formación de zonas anaerobias, con diferentes fermentaciones. Ante esta situación es inevitable que surja la pregunta, ¿son reusables estas cenizas?. Entre las diferentes posibilidades, en este trabajo se han estudiado, su uso como aditivo en materiales de construcción, y su aplicación agronómica, para mejorar las características físicas del suelo.



Esquema 1. Tratamiento global de aguas residuales.

II.
**CARACTERIZACIÓN FÍSICA
Y QUÍMICA DE LAS CENIZAS**

II. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LAS CENIZAS.

De cara a la utilización de las cenizas como materia prima, en la elaboración de ladrillos, o como enmendante agrícola, es necesaria su caracterización mineralógica, física y química.

La determinación de la mineralogía se realizó mediante difracción de rayos X, que es el método de investigación y análisis más fiable en cuanto a la determinación mineralógica. La mineralogía es fundamental para poder explicar las propiedades geotécnicas. La presencia de uno u otro mineral, nos permite determinar la plasticidad, expansividad y compresión del material estudiado. Los resultados mostraron, presencia abundante de Cuarzo, con algo de Mica, Vermiculita y Esmeclita (colapsada).

La composición química se llevó a cabo en los laboratorios de la empresa ASLAND, sobre una única muestra de cenizas. Se trata de una técnica de fluorescencia de rayos X, sobre muestras previamente calcinadas a 1000°C. Los resultados, se muestran en el cuadro 1, siendo la muestra analizada del tipo silíceo-cálcico-aluminoso.

Cuadro 1. Composición química de las cenizas.

SiO ₂	45.3
Al ₂ O ₃	15.0
Fe ₂ O ₃	3.2
CaO	19.3
MgO	2.0
SO ₃	1.8
K ₂ O	1.6
P.F.	8.83

P.F. Pérdida al fuego	

Con estos datos podemos decidir si las cenizas son puzolanas o no, entendiendo por puzolana, todo material silíceo natural o artificial que no teniendo las propiedades de los conglomerantes, contiene constituyentes que se combinan con la cal en presencia de agua a temperatura ambiente, originando compuestos de baja solubilidad y propiedades cementísticas. Como medida de la actividad puzolánica de una ceniza, se puede utilizar el módulo de hidraulicidad, M.

$$M = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{NaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3} \quad (1)$$

En nuestro caso el valor del módulo de hidraulicidad es 0.37, muy superior a los valores usuales, 0.10-0.15 de cenizas volantes, debido a la baja presencia de óxido de aluminio y la alta de óxido de calcio.

De cara a la utilización de las cenizas como enmendante agrícola, es necesaria la determinación de la concentración de metales pesados (Cd, Cu, Ni, Zn, Cr, Fe y Mn). No existe en España una legislación específica para cenizas de lodos, aunque como dato orientativo, si se regula la adición de metales pesados en fangos al suelo agrícola, R.D. 1310/1990 de 29 de octubre, quedando los niveles de metales pesados de las cenizas, por debajo de los límites impuestos a los lodos, cuadro 2. También se regulan los valores extremos, para las cantidades máximas anuales de metales pesados que se pueden introducir en el suelo, cuadro 3, siendo el metal limitante en nuestro caso el cobre, que nos permite una enmienda máxima de 14 tn anuales de cenizas. La determinación de metales pesados se realizó en el laboratorio de la empresa municipal de aguas de Córdoba, EMACSA, analizándose nueve muestras, tomadas, respectivamente, en febrero, mayo, junio (2), septiembre, octubre (3) y diciembre de 1994.

Cuadro 2. Valores límites de metales pesados en lodos destinados a utilización agraria.

PARÁMETRO	VALORES LÍMITE (ppm)		Cenizas
	Suelos con ph < 7	Suelos con ph > 7	
Cadmio	20	40	4.8
Cobre	100	175	85
Níquel	300	400	29.3
Plomo	750	1200	inapreciable
Zinc	2500	4000	769
Mercurio	16	25	inapreciable
Cromo	1000	1500	49

Cuadro 3. Valores extremos para cantidades anuales de metales pesados en el suelo que se pueden introducir.

PARÁMETROS	VALORES LÍMITE (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)
Cadmio	0.15
Cobre	12.0
Níquel	3.0
Plomo	15.0
Zinc	30.0
Mercurio	0.10
Cromo	3.0

La distribución relativa de partículas de los diferentes tamaños, se determinó mediante el método de sedimentación en húmedo, usando el densímetro, completado con un tamizado para la fracción gruesa, tamaño de partículas con diámetro superior a 74 mm. La textura de las cenizas analizadas, resultó ser franco-limosa. En el cuadro 4, se dan la distribución textural de tres muestras de cenizas, siguiendo la denominación de los componentes granulares según tamaños dado por la *Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo* (ISSS).

Cuadro 4. Distribución del tamaño de partículas de las cenizas.

Muestra	Arcilla	Limo	Arena
Cenizas I-94	24.29	45.77	29.95
Cenizas II-94	23.64	49.35	23.64
Cenizas V-94	19.93	58.98	19.93

Teniendo en cuenta la granulometría, podemos clasificar los suelos en función del *coeficiente de uniformidad*, dado por la expresión:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2)$$

siendo, D_{60} y D_{10} , las aperturas de las cribas por las que pasan el 60% y el 10%, respectivamente, de la muestra analizada, deducidos de su curva granulométrica. El coeficiente de uniformidad es superior a 5, por lo que se puede clasificar como de granulometría continua, cualidad muy de desear en materiales utilizados para los terraplenes, porque así se rellenan de partículas menores los huecos entre granos de partículas de mayor tamaño.

Como parámetros físicos, se estudiaron además de la granulometría, la consistencia (límites de Atterberg), la variación de la densidad con la humedad (curvas de compactación), y la resistencia a compresión simple. Al no ser posible la determinación de estos parámetros de las cenizas solas, se utilizó un suelo, Entic Peloxerert de la serie Carmona, procedente de la finca experimental Tomejil, de la Consejería de Agricultura y Pesca, mezclado con cenizas al 10, 15 y 20%, para estimar el efecto de éstas, sobre estos parámetros.

Los límites de consistencia, propuestos por Atterberg, utilizados en mecánica de suelos por Terzaghi y normalizados por Casagrande, NLT: 106/72 NLT: 105/72, permiten predecir el comportamiento de un suelo en función de su grado de humedad. Los límites obtenidos, cuadro 5, indican un aumento del índice de plasticidad, al añadir cenizas. Según esta clasificación, al mezclar el suelo con las cenizas, en cualquiera de los porcentajes, pasa de tener una compresibilidad media a alta.

Las probetas así conseguidas se mantuvieron en condiciones de laboratorio a una temperatura aproximada de 22°C y 60%. Se procedió a la rotura a compresión de cinco probetas, de cada una de las mezclas, al cabo de 1, 3, 7 y 28 días respectivamente.

Observando los resultados de el cuadro 8, se observó una leve disminución de la resistencia a compresión simple en el caso del suelo como testigo con el tiempo, y un aumento pronunciado, en las tres mezclas restantes, siendo éste más acentuado en el 15%. Aún no teniendo propiedades puzolánicas propiamente dichas, se produce alguna reacción química al mezclar el suelo con las cenizas, que aumenta su resistencia a compresión.

Cuadro 8. Resistencia a compresión simple.

Tiempo (días)	Suelo	Mezcla 10%	Mezcla 15%	Mezcla 20%
1	0.96	1.20	1.11	1.11
3	0.92	1.16	1.24	1.26
7	0.79	1.23	1.28	1.21
28	0.77	1.33	1.43	1.38

III.
APROVECHAMIENTO
DE LAS CENIZAS COMO MATERIAL
DE CONSTRUCCIÓN

III. APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN.

III.1. INTRODUCCIÓN. Por sus características las cenizas procedentes de la desecación de lodos de depuradora, pueden sustituir, al menos parcialmente la materia prima, usada en la producción de ladrillos.

Como materias primas para los ensayos, se usaron las propias de la fabricación de cerámica, arcilla plástica fina y arena amarilla como fracción gruesa o desengrasante. Se añadieron cenizas de depuradora como material inerte de relleno, que sustituyó a la arena, en los porcentajes indicados en el cuadro 9. La arcilla y la arena amarilla, son las materias primas utilizados por una fábrica de ladrillos de Aguilar de la Frontera (Córdoba), PROCERAN.

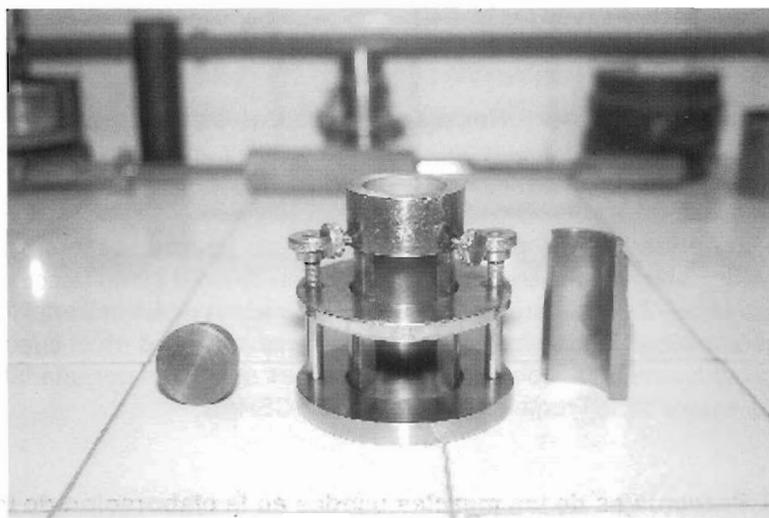
Cuadro 9. Porcentajes de las mezclas usadas en la elaboración de ladrillos (masa).

Arcilla	73.6	73.6	73.6	73.6	73.6	75.0
Arena	26.4	21.4	16.4	11.4	6.37	0.00
Cenizas	0.00	5.00	10.0	15.0	20.0	25.0

La mineralogía de estas materias primas, indican presencia de calcita, cuarzo y dolomita, en la arcilla y calcita y cuarzo en la arena. La arcilla tiene una composición textural arcillo-limosa, mientras que la arena es franco-arenosa.

Un material, es susceptible de ser utilizado, como materia prima en la fabricación de ladrillos de construcción, si el porcentaje de AL_2O_3 , oscila entre el 12 y el 22% y el de Fe_2O_3 es inferior al 3%. Teniendo en cuenta los resultados de la composición química, dados en el cuadro 1, las cenizas quedan dentro del intervalo del Fe_2O_3 . La adición, mejora el porcentaje de AL_2O_3 de la mezcla. Por otro lado, aunque se supera en 0.2% el valor mínimo de Fe_2O_3 , no es importante debido a que aún en el caso de la mayor adición de residuos, quedaría este índice por debajo del valor máximo establecido.

Las probetas se realizaron en el molde cilíndrico de metal que aparece en la fotografía 1, de 86.9 cm³ de capacidad, correspondientes a un diámetro de 3.81 cm y una altura de 7.62 cm, con su base y su collar. Está partido longitudinalmente en tres secciones para desmodelar con facilidad. Se utilizó una maza metálica de 1515 gramos, de base circular adaptada al interior de una guía tubular, que proporciona una altura de caída de 20 cm. El esfuerzo de caída de la maza se repartió homogéneamente sobre una chapa metálica que abarcaba el diámetro del cilindro. Las piezas conseguidas, no presentaron agrietamientos ni retorcimientos apreciables.



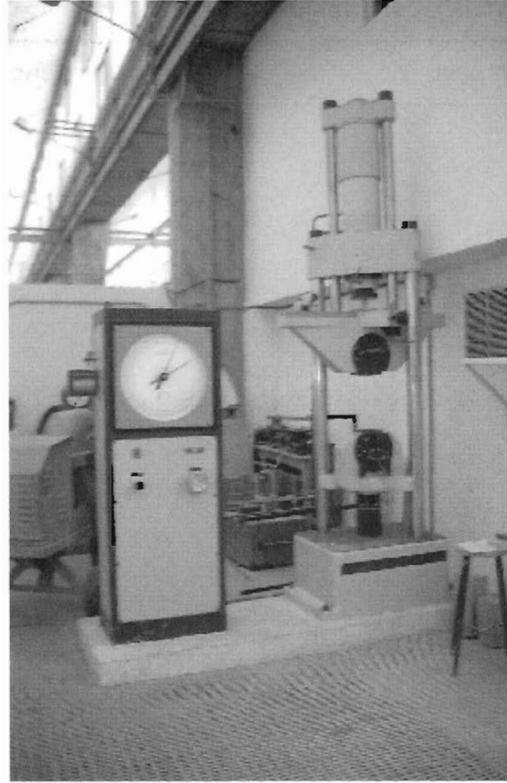
▲ Foto. L. Moya.comunicacion

La cocción de las probetas secas, se llevó a cabo en el horno de la fábrica PROCERAN, según su propio ciclo de cocción. Con estas probetas, se efectuaron los ensayos especificados en la norma.

III.2. EFECTO DE LA ADICIÓN DE CENIZAS SOBRE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN.

La compresión del ladrillo, es definida por la norma UNE 67-026-84, como la carga unitaria aparente de rotura, bajo un esfuerzo axial de compresión en dirección del grueso, medida menor, del ladrillo.

Para este ensayo se tomaron cuatro probetas cocidas de cada mezcla. La relación entre la altura y el diámetro de las mismas fue de 2:1, suficiente para la realización de este ensayo. Todas las probetas se ensayaron sometiéndolas a un esfuerzo normal, aplicando la carga centrada en la cara superior de la probeta. El ensayo se llevó a cabo en la prensa de laboratorio, que aparece en la fotografía 2. Como resultado del ensayo, se tomó el valor característico, que es aquel que tiene una probabilidad del 95% de ser alcanzado, cuadro 10.



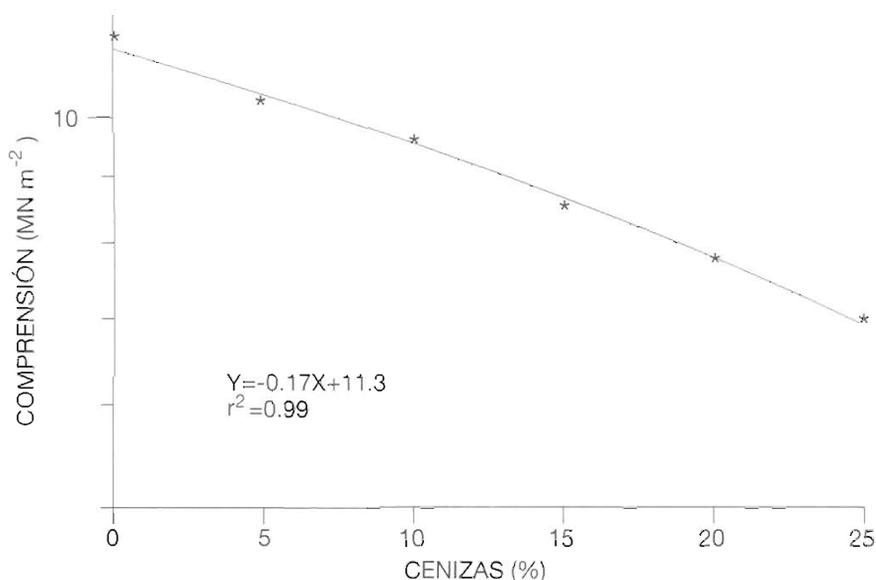
▲ Foto 2.- Prensa de laboratorio para pruebas de resistencia

En la figura 2., se representa la resistencia a compresión, MNm^2 , frente al porcentaje de cenizas añadidas a la mezcla. Los datos tienen un ajuste lineal, descendiendo la resistencia a medida que aumenta el porcentaje de cenizas añadidas. Esto puede explicarse, debido al aumento de agua durante el moldeo. Como dato indicativo, la Norma NBE FL-90, pliego RL-88, especifica que el valor característico, no será inferior a 9.8 MNm^{-2} para ladrillos macizos y perforados. Esto restringiría, en el caso más desfavorable la máxima adición de residuos al 5%, aunque no se puede generalizar, debido a que las probetas no corresponden exactamente con el material que especifica la norma.

Cuadro 10. Resistencia a compresión.

% Cenizas	Resistencia KNm ⁻²
0	11.4
5	10.3
10	9.6
15	8.6
20	7.8
25	7.0

Figura 2. Resultados de la resistencia a compresión.

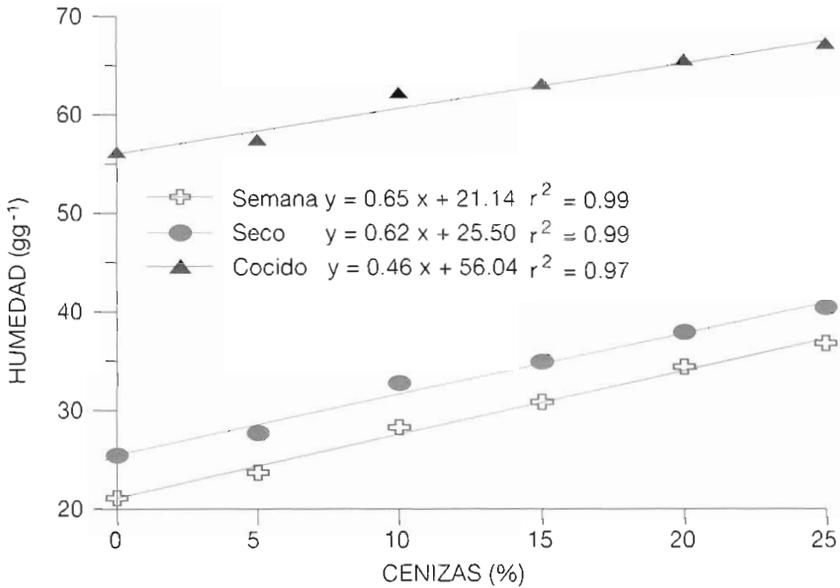


III.3. EFECTO DE LA ADICIÓN DE CENIZAS SOBRE LA DENSIDAD APARENTE Y LA HUMEDAD. La Norma NBE FL-90 define la densidad aparente como el cociente entre el peso del ladrillo seco y el volumen normalizado. La humedad viene expresada en términos de masa.

Las determinaciones de la densidad aparente y de la pérdida de humedad de las probetas, se llevaron a cabo con una muestra de treinta probetas en cada caso. Se realizaron medidas a la semana de haberlas obtenido, manteniéndolas sobre una tela metálica en condiciones de laboratorio, *semana*, una vez secas, después de pasar por una estufa de aire caliente a una temperatura de 80°C, durante un día, secas y después de someterlas al ciclo de cocción, cocidas.

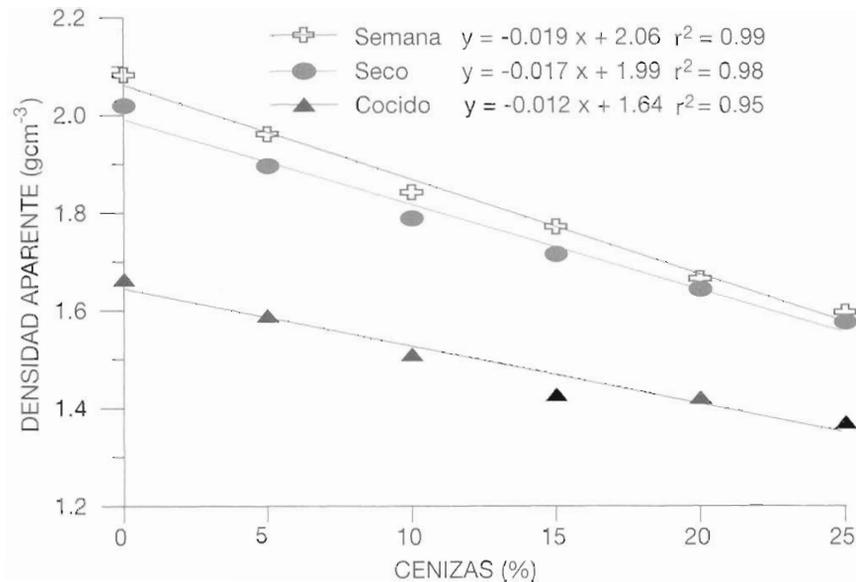
Representando los valores medios frente al porcentaje de cenizas añadidas, frente a la humedad y la densidad en las figuras 3 y 4 respectivamente, se observa un aumento progresivo de la humedad con el porcentaje de cenizas añadidas. Este es un efecto adverso, ya que la eliminación de agua de amasado, demanda mucha energía.

Figura 3. Variación de la humedad, con la incorporación de cenizas.



La densidad aparente disminuye a medida que aumenta la presencia de cenizas, lo que indica una mayor porosidad del material adicionado. La norma NBE FL-90, indica que en los ladrillos que han de usarse a cara vista, que se utilizan sin revestir, el valor medio de la densidad aparente no puede ser inferior a 1.05 gcm⁻³, que en todos los casos es superior.

Figura 4. Variación de la densidad aparente, con la incorporación de cenizas.



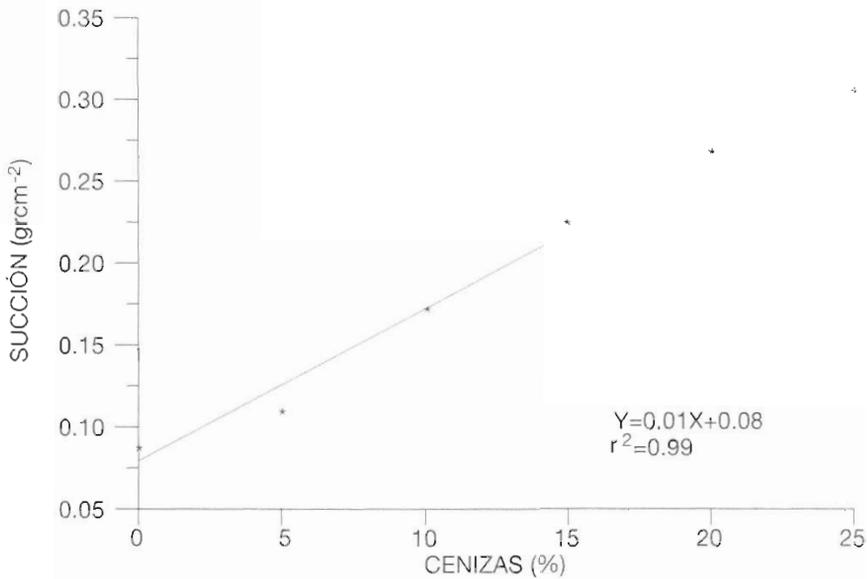
III.4. EFECTO DE LA ADICIÓN DE CENIZAS SOBRE LA SUCCIÓN.

Se define la succión del agua por los ladrillos, a la cantidad de aquella que es absorbida durante una inmersión parcial de corta duración. Se tomaron 3 probetas cocidas, midiéndose la superficie que iba a estar en contacto con el agua. Se tomó una bandeja y se llenó con la cantidad de agua precisa para que, una vez colocada la pieza sobre los apoyos, el nivel quedara constante durante el tiempo de duración del ensayo, 1 minuto, 3 mm por encima del borde superior de los mismos. Se secaron superficialmente las probetas con un paño húmedo, escurrido, obteniéndose su peso. Como resultado, se tomó el valor característico.

La norma NBE FL, en el pliego de condiciones técnicas particulares RL 88, exige que, en ningún caso, la succión supere $0.45 \text{ gcm}^{-2}\text{min}^{-1}$. En todos los casos, cuadro 14, se cumple este requisito.

La figura 5, muestra el aumento lineal de la succión a medida que aumenta el porcentaje de cenizas añadido.

Figura 5. Variación de la succión con el porcentaje de cenizas añadidas.



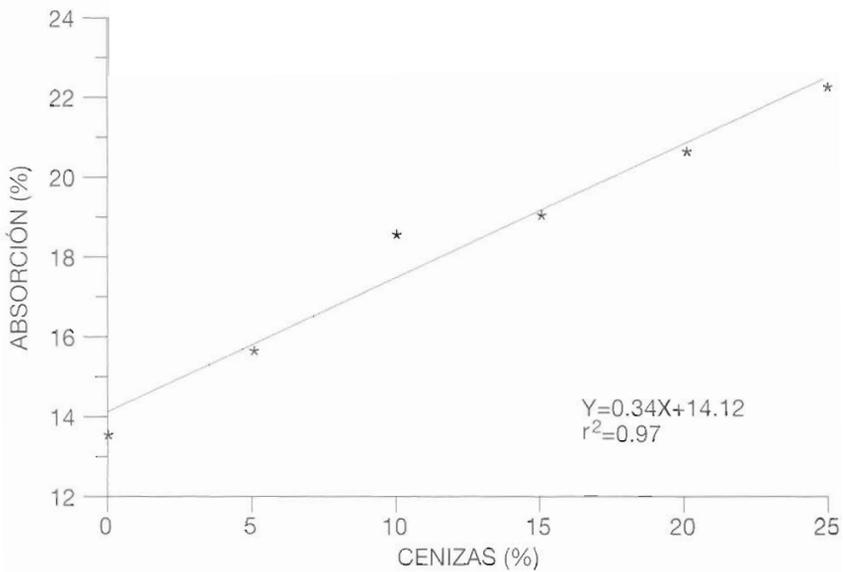
III.5. EFECTO DE LA ADICIÓN DE CENIZAS SOBRE LA ABSORCIÓN.

La absorción es una medida del humedecimiento cuando se sumerge un ladrillo totalmente en agua durante un período prolongado. El ensayo se realizó con seis probetas cocidas. Una vez secas, las probetas se introdujeron de canto en el tanque, lentamente, consiguiendo su inmersión completa, gradualmente durante tres horas. A la 24 horas del inicio de la inmersión, se sacó del agua cada probeta, secándose con un paño húmedo y pesándose, volviéndose a introducir en el agua. Cada 24 horas se continuó pesando las muestras, hasta que en dos pesadas consecutivas difieran en menos de 0.1%.

Como resultado del ensayo, se da la absorción específica A , definida como el porcentaje en peso de la muestra, debido a la ganancia de agua, siendo G_s y G_e , los pesos de las probetas antes y después de realizarse el ensayo.

La absorción de agua, aumenta con la adición de cenizas, paralelamente al aumento de la porosidad, figura 6.

Figura 6. Variación de la absorción específica con las dosis de cenizas.



III.6. EFECTO DE LAS CENIZAS SOBRE LA RESISTENCIA A LA INTÉRPRETE. (HELADICIDAD).

La heladicidad es un índice de su susceptibilidad a ciclos sucesivos de heladas y deshielos, norma UNE 67-028-84. Se define por la disminución de la resistencia a la compresión de las probetas antes y después de haber sido sometida a 25 ciclos de hielo y deshielo.

Completados los 25 ciclos de hielo y deshielo, se procede a la inspección ocular de las piezas, comprobando que durante el ensayo no se han producido exfoliaciones fisuras o desconchados. La aparición durante el ensayo de cualquiera de los defectos citados, según especifica la norma UNE 67-019 en cualquier probeta califica al ladrillo como heladizo. En caso de duda o de no observación de estos defectos, se procederá a realizar el ensayo comparativo de resistencia a la compresión según la norma UNE 67-026.

A la vista de los ensayos, no se observaron en ningún caso exfoliaciones, fisuras ni desconchados. Se procedió a realizar el ensayo de compresión. Los resultados de este ensayo, cuadro 11, muestran que para todos los tratamientos, las probetas pueden ser consideradas como no heladizas.

La norma UNE 67-026 califica los ladrillos según un parámetro L obtenido, mediante la siguiente expresión:

$$L = \frac{R_A}{R_B} \quad (3)$$

siendo, R_A , el valor medio de la resistencia de las probetas de la serie A, sometida a los ciclos de hielo y deshielo, R_B , el valor medio de la resistencia de las probetas de la serie B, no sometida al ensayo, como, *no heladizos*, para valores de L, mayores o iguales a 0.8, *potencialmente heladizos*, para valores comprendidos entre 0.7 y 0.8, y *heladizos* para valores inferiores a 0.7.

Cuadro 11. Resultados de heladicidad.

% Cenizas	L
0	0.92
5	0.95
10	0.99
15	0.89
20	0.97
25	0.98

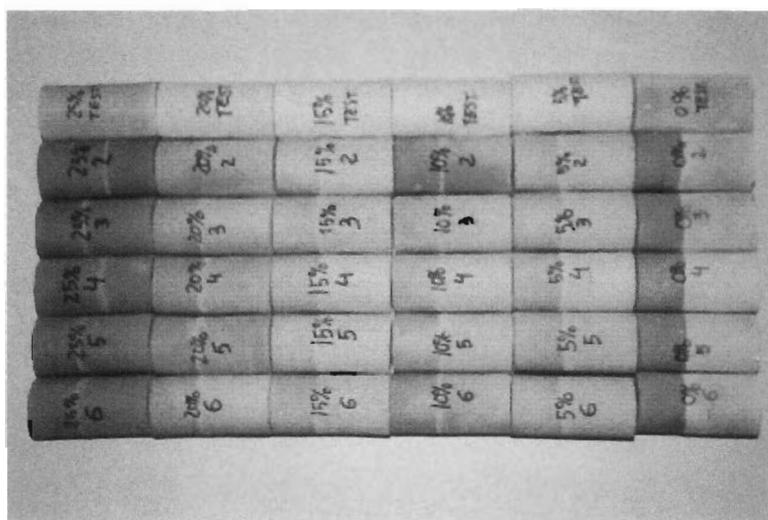
III.7. EFECTO DE LA ADICIÓN DE CENIZAS SOBRE LA EFLORESCENCIA.

La eflorescibilidad de un ladrillo es un índice de su capacidad para producir, por expulsión de sus sales solubles, manchas en sus caras. Las eflorescencias aparecen frecuentemente durante el tiempo seco en la superficie de las construcciones. Son manchas superficiales en las caras de los ladrillos, generalmente blanquecinas, producidas por la cristalización de sales solubles, arrastradas por el agua hacia el exterior en los ciclos de humectación-secado.

Un ladrillo ha sido bien cocido cuando dentro de su masa se ha formado una estructura cerámica adecuada; sin embargo, no es posible determinar por el aspecto u otros ensayos sencillos si tal estructura ha tenido lugar. El ensayo se realizó sobre una muestra de seis probetas cocidas, una se conservó como patrón y las otras cinco se sometieron al ensayo.

Después de someter las probetas al ensayo, se observaron las caras vistas de los seis ladrillos procediéndose a la calificación individual según el siguiente criterio, dado por la norma 67-029-85. La calificación de la muestra será la correspondiente al mayor número de las piezas de la misma. En el caso de producirse la coexistencia de probetas calificadas como eflorecidas y no eflorecidas, se repetirá el ensayo.

No se observaron diferencias entre las probetas testigo y las sometidas al ensayo, por lo que se puede concluir, que no sufrieron problemas de eflorescencia, como se aprecia en la fotografía 3.



▲ Foto 3 - Resultados de efluencia de cenizas

Por contra en las probetas sin cenizas, apareció un velo fino y pequeñas manchas blanquecinas en las partes superior e inferior, por lo que podemos clasificarlas como ligeramente efluencia, y las adicionadas con cenizas, en cualquier porcentaje, como no efluencia.

**IV.
APROVECHAMIENTO
DE LAS CENIZAS
COMO ENMENDANTE AGRÍCOLA**

IV. APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS COMO ENMENDANTE AGRÍCOLA.

IV.1. INTRODUCCIÓN. La segunda línea de estudio, ha sido el aprovechamiento de las cenizas como enmendante agrícola, en suelos que presentan problemas de endurecimiento. Se trata de un deterioro estructural durante la desecación, aumentando su consistencia, en lo que es conocido por endurecimiento, dificultándose su posterior cultivo, hasta que se humedecen nuevamente. En estos suelos que en su estado natural, son incapaces de formar agregados estables en agua, se produce con facilidad un colapso irreversible de los agregados. Cuando se humedecen, se produce un encostramiento en la superficie, que impide la emergencia de las plantas.

El problema de endurecimiento, ocurre principalmente en suelos con baja concentración de materia orgánica, y una textura entre 10 y 35% de arcilla en la zona superficial, que puede influir en la formación de costra. La mayoría de los suelos estudiados con este problema, tienen una mineralogía de la arcilla, dominada por caolinita e illita, asociadas a una débil capacidad de contracción e hinchamiento.

Es un problema que ha sido ampliamente estudiado en Australia, donde un 13% de los suelos presentan este problema, aunque no es el único país, puesto que, aparecen también en Estados Unidos, o en Gran Bretaña. Se conocen suelos con problemas similares en España, y concretamente en Andalucía, si bien la documentación sobre ellos es muy escasa.

Entre los problemas asociados a estos suelos se citan; I) la inestabilidad de la estructura en agua, II) mala aireación en condiciones húmedas, III) velocidad de infiltración reducida, IV) gran susceptibilidad frente a la erosión y V) dificultades de nascencia en el lecho de siembra de la semilla.

Las soluciones sugeridas para resolver estos problemas del suelo, han sido variadas, la aplicación de enmiendas como el yeso que permite el desarrollo de la estructura, el manejo del riego y el fomento de la actividad biológica en el suelo. Los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, pueden actuar como cementantes o estabilizantes, formando microagregados estables en agua. Ambos óxidos están presentes en las cenizas de fangos de aguas residuales.

Ante la posibilidad de mejorar el suelo, aumentando la formación de agregados estables en agua, y la proximidad de zonas agrícolas con problemas de endurecimiento, a la estación depuradora de aguas residuales de Córdoba, se planteó como solución, la enmienda de dichos suelos, con cenizas de fangos. Se puso especial atención sobre las propiedades mecánicas, como el esfuerzo a rotura del suelo, la resistencia a la penetración, o la erosión por salpicadura y sobre las propiedades de retención y transmisión del agua en el suelo.

Los suelos estudiados fueron ambos *Xerofluent típico*, de la Vega de Córdoba, uno de la *Estación Experimental Alameda del Obispo*, suelo A, y otro de la finca *La Algarrilla*, suelo B, situada en el término municipal de Almodóvar del Río, Córdoba. Los porcentajes de arcilla y la materia orgánica, de estos dos suelos se dan en el cuadro 12. Los ensayos se realizaron siempre sobre ambos suelos, siendo el segundo un testigo, que se enmendaron con diferentes dosis de cenizas, 5 y 10 t_{ha}⁻¹.

Cuadro 12. Propiedades de los suelos A y B.

	Arcilla (%)	Materia orgánica (%)
Suelo A	14.5	1.9
Suelo B	29.6	1.52

IV.2. EFECTO DE LA ADICIÓN DE CENIZAS SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO.

IV.2.1. Efecto sobre la friabilidad del suelo.

El esfuerzo mecánico del suelo es importante tanto desde el punto de vista del crecimiento de las raíces y del cultivo. Es importante conocer la magnitud y la distribución del esfuerzo de los agregados, así como la variación del esfuerzo con el tamaño de los agregados y el tipo de suelo. Un parámetro que puede servir para caracterizar de alguna manera el esfuerzo mecánico es la friabilidad, definida como la tendencia de la masa de suelo libre de romperse y desmoronarse libremente bajo la aplicación de condiciones de stress, en pequeños fragmentos, agregados y partículas de suelo individuales.

Es difícil, seleccionar una magnitud de la friabilidad, para caracterizar un suelo para que pueda denominarse friable. En el cuadro 13, se establece un criterio de clasificación de suelos en función de la friabilidad, K_s .

Cuadro 13. Tipo de suelo en función de la friabilidad (K_s).

$K_s = 0$	Materia plástica
$K_s < 0.05$	No friable
$0.05 \leq K_s \leq 0.10$	Ligeramente friable
$0.10 \leq K_s \leq 0.25$	Friable
$0.25 \leq K_s \leq 0.40$	Muy friable
$K_s > 0.40$	Mecánicamente ine

El ensayo se realizó, en los dos suelos citados anteriormente, suelo A, y suelo B, con tres dosis de cenizas, testigo (0), 5 t/ha-1 (5) y 10 t/ha-1 (10). Las muestras de suelo, se sometieron previamente al ensayo, a dos ciclos de humedecimiento y secado. Los intervalos de diámetros de las partículas probadas, fueron los comúnmente encontradas en la bibliografía, 3.5, 6, 12, 18 y 36 mm. En todos los casos, los agregados se supusieron esferas perfectas para calcular su volumen.

La tensión de ruptura, S, la calcularemos según la expresión:

$$S = \frac{3F1}{2bd^2} \tag{4}$$

siendo F, la fuerza necesaria para fracturar los agregados de anchura b, y profundidad d, siendo l la distancia entre las placas paralelas donde se rompen los agregados.

Si se representa en unos ejes coordenados, los logaritmos del volumen de las partículas (v), y de la tensión de ruptura, se obtiene una relación:

$$\ln S = - K_s \ln v + A \tag{5}$$

siendo K_s , la pendiente de la recta, anteriormente introducido.

En las figuras 7 y 8 se representan, en ejes logarítmicos, los resultados obtenidos para los dos suelos, para las distintas mezclas. En la cuadro 14, se muestran los valores de friabilidad, el coeficiente de correlación, r^2 , para cada uno de los tratamientos y el número de datos, n.

Cuadro 14. Friabilidad de los suelos con y sin enmiendas.

Suelo	K_s	r^2	n
A0	0.23	0.77	120
A5	0.32	0.61	120
A10	0.35	0.77	120
B0	0.22	0.56	120
B5	0.25	0.69	120
B10	0.40	0.66	120

Se observa que para ambos suelos, pasan de considerarse friables, para los tratamientos testigos, a muy friables en el caso de adición de cenizas en cualquier porcentaje, lo que favorece la facilidad del suelo para ser trabajado, facilitando de esta manera la preparación del lecho de siembra, para una óptima nascencia de la semilla.

Figura 7. Friabilidad para el suelo A.

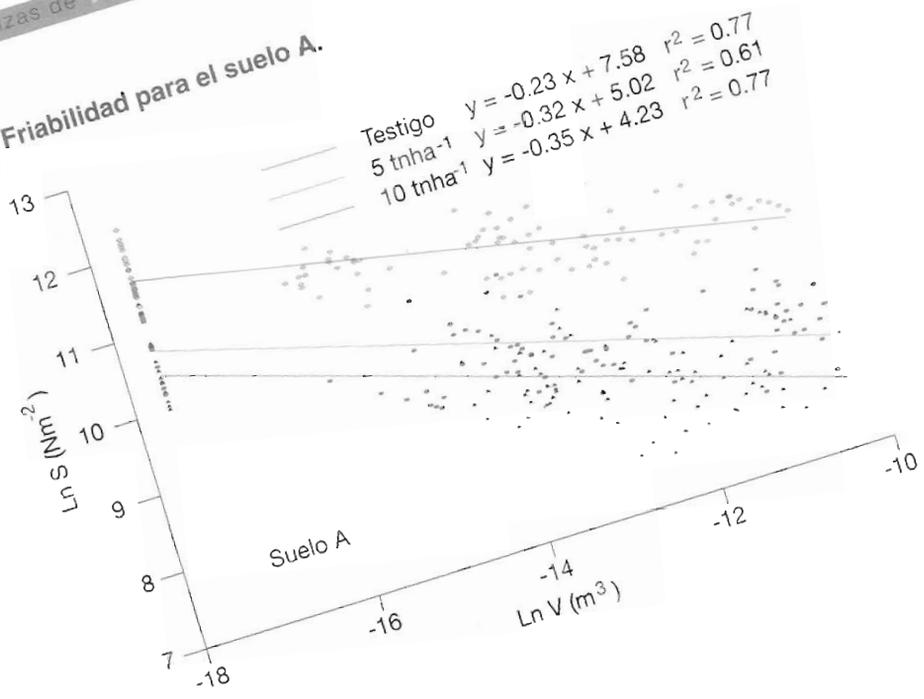
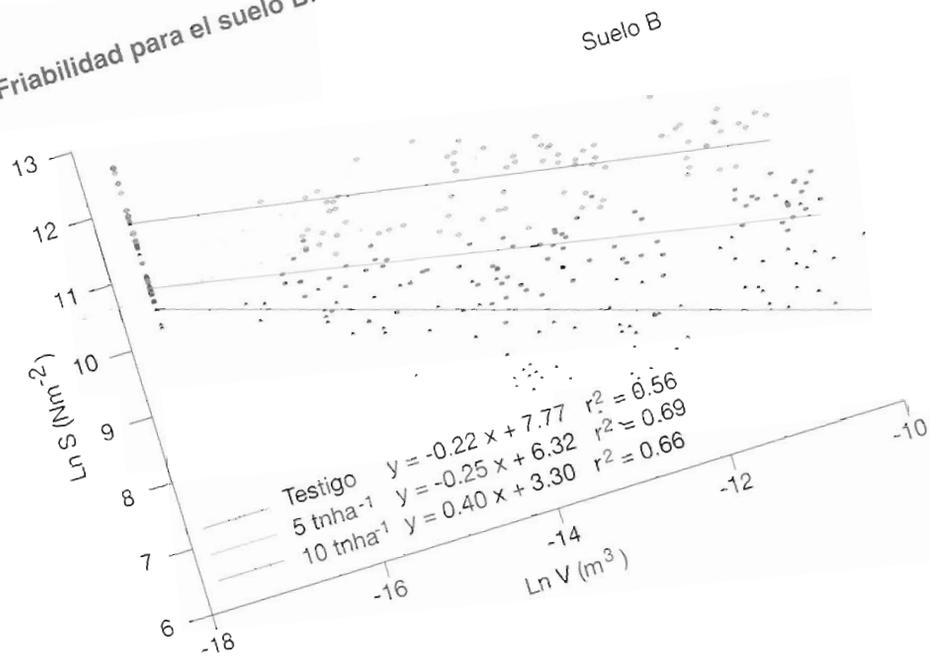


Figura 8. Friabilidad para el suelo B.



IV.2.2. Efecto sobre la resistencia a la penetración.

Las raíces son la fuente de abastecimiento de agua y nutrientes minerales necesarios para el desarrollo de la planta. En la mayoría de suelos y climas, el sistema radical está cercano a la superficie, donde se concentran la mayoría de nutrientes minerales.

Para estudiar el efecto de la adición de cenizas sobre la resistencia a la penetración se utilizó el penetrómetro. Es el mejor método indirecto para estimar la resistencia del suelo a la expansión del sistema radicular y el crecimiento de la plántula.

Se presentan muchas dificultades para el estudio de la resistencia al crecimiento de las raíces en el suelo, debido a la heterogeneidad del mismo y sus efectos sobre el aire atrapado, y el aporte de agua y nutrientes. Para simplificar esta situación, se puede estudiar, y así lo hacemos nosotros en este ensayo, el crecimiento de las raíces en suelos artificiales que permiten controlar cuidadosamente el medio que rodea a la raíz. Se realizaron cinco pinchazos sobre los dos suelos A y B, sometidos a dos ciclos de secado y humedecimiento, con las adiciones de cenizas y los testigos, hasta una profundidad de 90 mm. Al ser la resistencia a la penetración del suelo función entre otros parámetros del grado de humedad, se hicieron ensayos con el suelo seco y saturado.

Como resultado del ensayo, se representan en las figuras 9, 10, 11 y 12, el índice de cono, resistencia en MPa, en intervalos de profundidad constantes de 5 mm de cinco pinchazos, así como su media, que se unen mediante una curva. En cada gráfico se representan el suelo testigo, y adicionado con 5 y 10 t_{nh}a⁻¹ de cenizas de aguas residuales.

Las figuras 9, 10, 11 y 12, se corresponden con el suelo A, seco y saturado, y con el suelo B, seco y saturado respectivamente.

En ambos suelos se observa una disminución importante del índice de cono, cuando el suelo está seco, a medida que aumenta el porcentaje de cenizas adicionado, siendo mayor esta reducción en el suelo B. Cuando el suelo está saturado, se observa un aumento de la resistencia a la penetración a medida que aumenta la proporción de cenizas en ambos suelos estudiados. Esto va a favorecer, la formación del sistema radicular de cualquier cultivo, disminuyendo el problema de la nascencia en el lecho de siembra en suelos con problemas de endurecimiento.

Figura 9. Índice de Cono del suelo A seco.

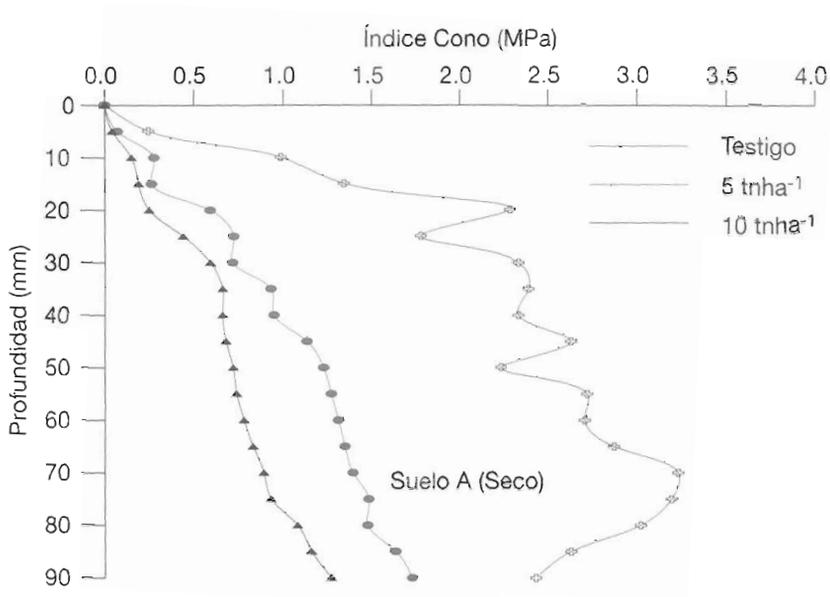


Figura 10. Índice de Cono del suelo A saturado.

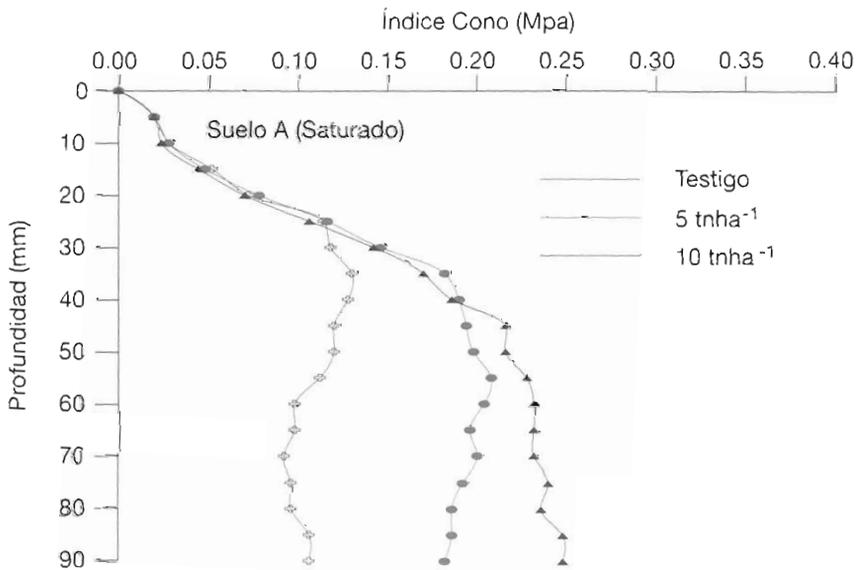


Figura 11. Índice de Cono del suelo B seco.

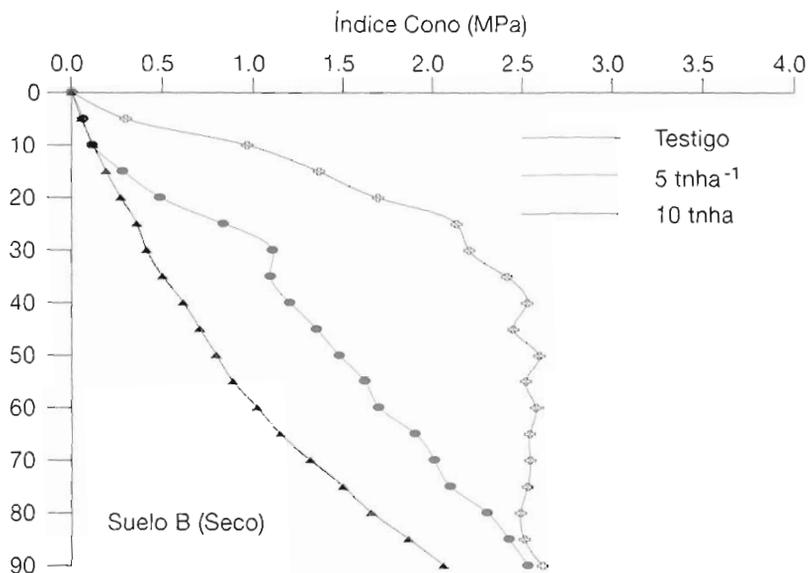
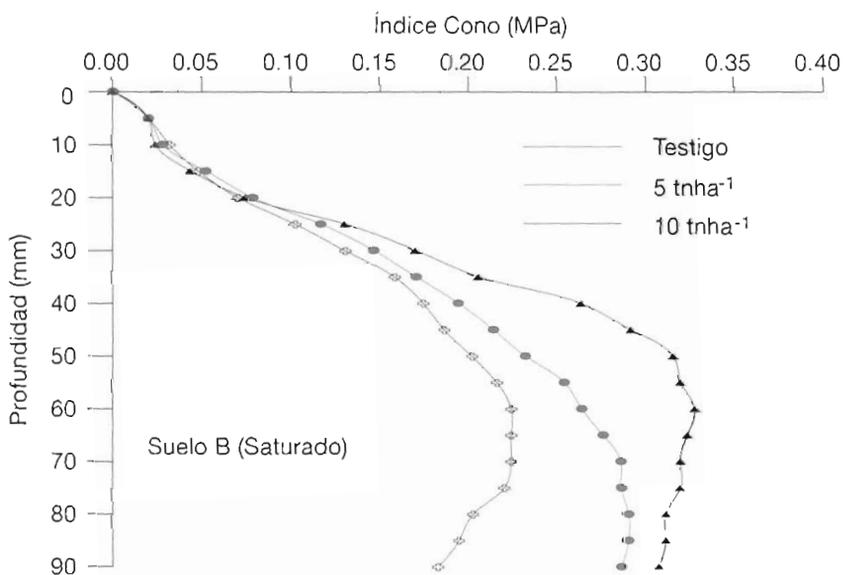


Figura 12. Índice de Cono del suelo B saturado.



4.2.3. Efecto sobre la erosión por salpicadura.

La erosión del suelo es un conjunto de procesos de arranque y transporte de materiales del suelo por el agua y el viento. Un agente erosivo importante, es el impacto de gotas de lluvia.

La desintegración de los agregados del suelo y su compactación por el impacto de las gotas de lluvia, asociado a la dispersión físico-química de la arcilla del suelo que al ser arrastrada por el agua, obstruye los poros por debajo de la superficie, restringiendo el paso de agua hacia el interior del suelo, conduce a la formación de costra.

Un manejo adecuado del suelo reduciendo labores y seleccionando para labores superficiales, incluyendo cubiertas, ya sea vegetal viva o de residuos, puede bastar para aumentar la infiltración y el almacenamiento de agua y reducir la erosión.

Una posible estimación de la formación de costra es la masa de suelo erosionado, por el impacto de las gotas de lluvia, que permite evaluar la eficiencia de cualquier método empleado para reducir este fenómeno.

En este ensayo se pretende comparar el efecto del impacto de la gota de lluvia, sobre la masa de material erosionado en los suelos A y B, modificados por la adición de cenizas de fangos de aguas residuales en 5 y 10 t/ha-1, bajo condiciones de sequedad y saturación.

El tratamiento de los datos, se obtuvo mediante la relación entre la masa de suelo acumulada en coronas, y la distancia media ponderada de dicha corona.

En la figura 13 se representa para el suelo A saturado, la relación definida, observándose una disminución de suelo erosionado en todas las distancias, a medida que aumenta el porcentaje de cenizas añadidas. En la figura 14 para el mismo suelo y en condiciones de sequedad, se observa globalmente una disminución de la masa de suelo erosionado, a medida que aumenta el porcentaje de cenizas.

Las figuras 15 y 16 reflejan los resultados del suelo B en condiciones de saturación y sequedad, siendo importante el aumento de suelo erosionado al disminuir la cantidad de residuo adicionado.

Figura 13. Ensayo de erosión para el suelo A saturado.

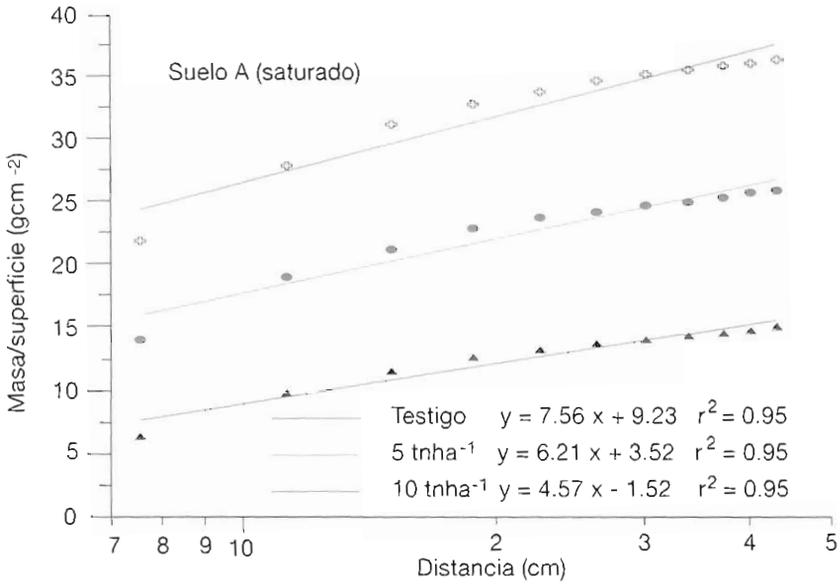


Figura 14. Ensayo de erosión para el suelo A seco.

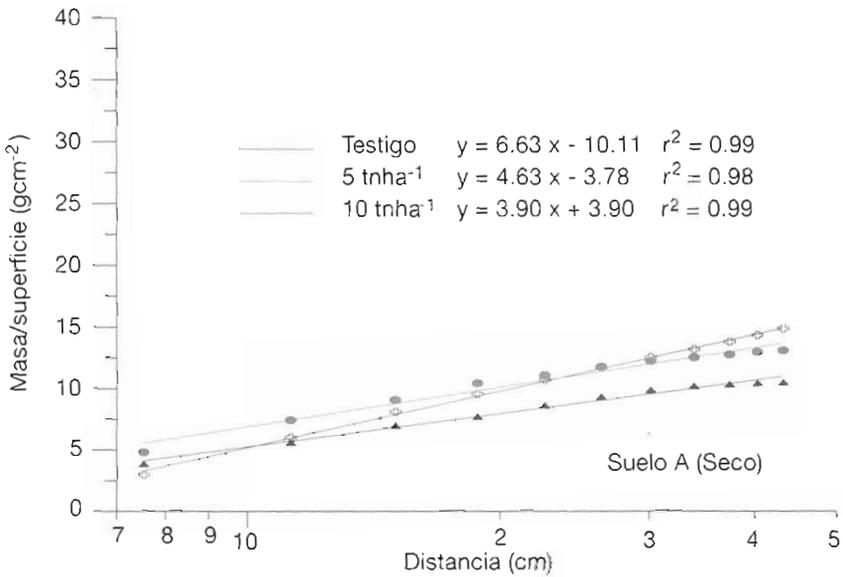


Figura 15. Ensayo de erosión para el suelo B saturado.

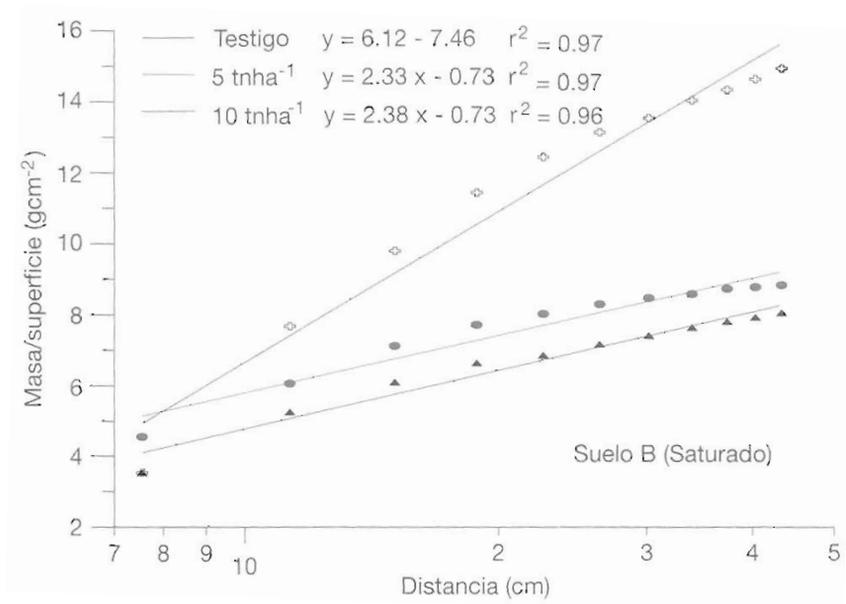
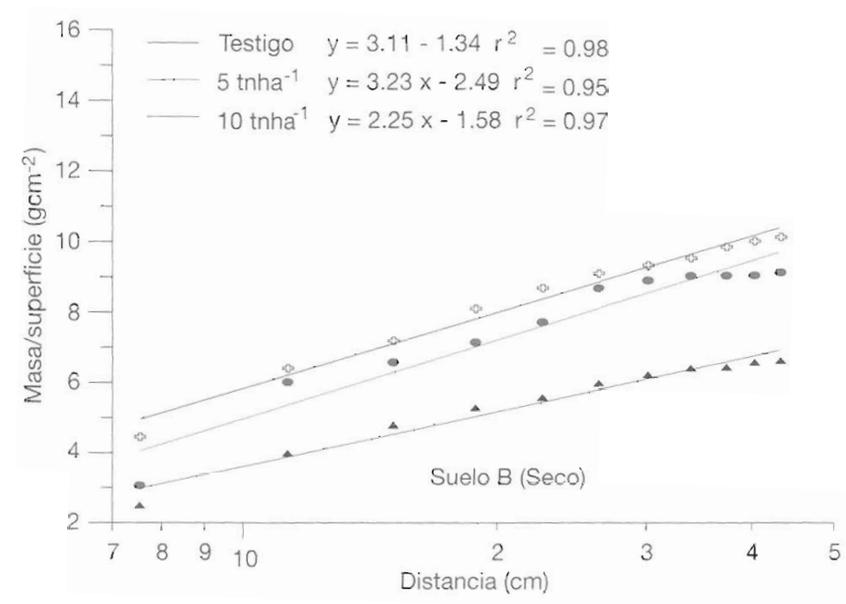


Figura 16. Ensayo de erosión para el suelo B seco.



IV.3. EFECTO DE LA ADICIÓN DE CENIZAS SOBRE LAS CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD.

El aporte de agua del suelo a las raíces, requiere una capacidad de almacenamiento de éste. La mayoría de los cultivos agrícolas pueden extraer agua del suelo, hasta el punto de marchitamiento permanente, a partir del cual la planta se muere.

La relación entre el potencial matricial y la humedad volumétrica de un suelo, viene dada por su curva de retención de humedad, que es característica de cada tipo de suelo. En este apartado, vamos a estudiar la posible modificación de las curvas de retención de humedad al adicionar al suelo cenizas de aguas residuales.

En las figuras 17 y 18, se representan las curvas de retención de humedad para los suelos A y B respectivamente, como testigos y enmendados con las dosis de cenizas ya citadas. Se observa un aumento de la capacidad de retención de humedad en ambos suelos con la adición de cenizas, siendo éste un efecto beneficioso, ya no sólo por la mayor disponibilidad de agua a menores potenciales de succión, sino por la mayor presencia de poros pequeños que mejoran las condiciones en el semillero, en el contacto suelo-semilla. Esto se puede explicar por la presencia de las cenizas, que como material fino, rellena los huecos del suelo.

Figura 17. Curva de retención de humedad, suelo A.

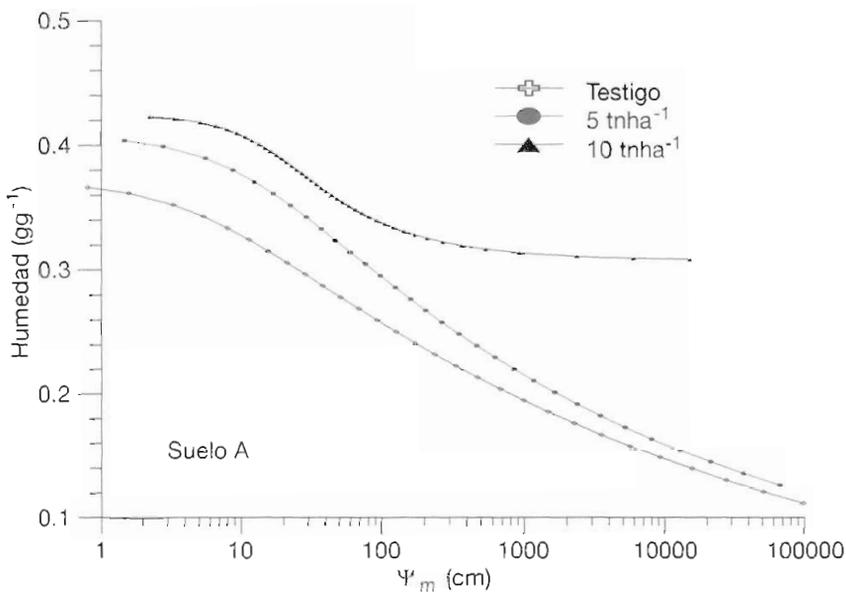
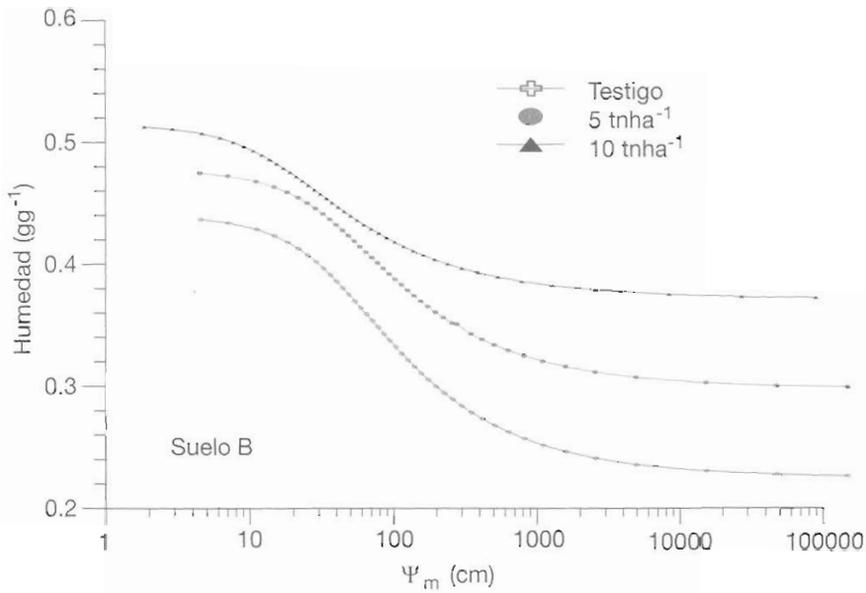


Figura 18. Curva de retención de humedad, suelo B.



IV.4. EFECTO DE LA ADICIÓN DE CENIZAS SOBRE LA DIFUSIVIDAD.

La capacidad del suelo para transmitir agua, se ve severamente perjudicada, cuando el suelo tiene formas encostradas. Un rápido humedecimiento puede causar un llenado de los micro-agregados, siendo imposible transmitir el agua en igual proporción a la que le llega, ya sea por riego o por lluvia. Una medida del movimiento del agua en el suelo, es la difusividad.

La difusividad, es una característica física que relaciona la velocidad de transmisión del agua en el suelo con el gradiente de humedad, según la relación entre la conductividad hidráulica K , la componente matricial del potencial (ψ_m) y el contenido de humedad volumétrica (θ). $D = K d\psi/d\theta$. La difusividad depende únicamente de la humedad θ , si no hay histéresis.

Los resultados de la difusividad, se dan en las figuras dad, figuras 19 y 20. Se observa un aumento de la difusividad en ambos suelos, al aumentar las dosis de cenizas adicionadas, para idénticas humedades. Esto puede traducirse como un índice de la menor tendencia al endurecimiento de este tipo de suelos, al ser menos susceptibles al encharcamiento, debido a su previsible mayor velocidad de infiltración.

Figura 19. Relaciones entre la difusividad y la humedad, suelo A.

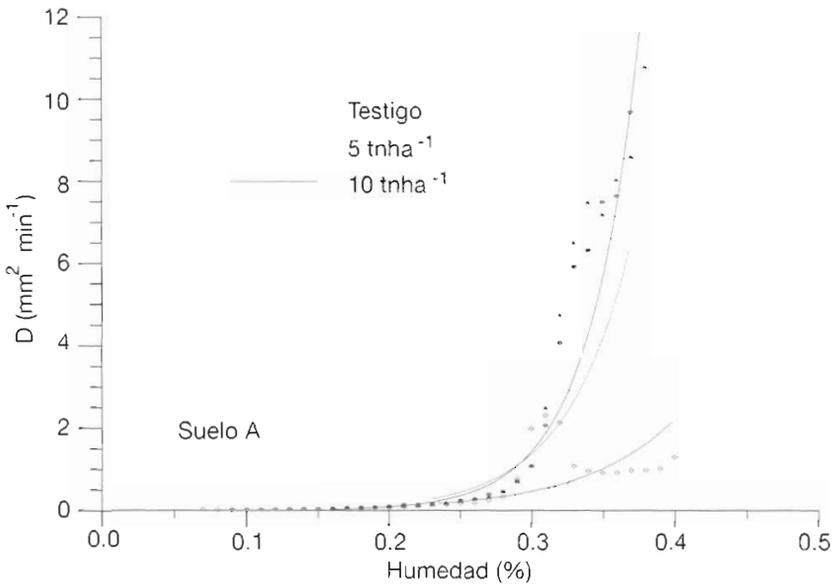
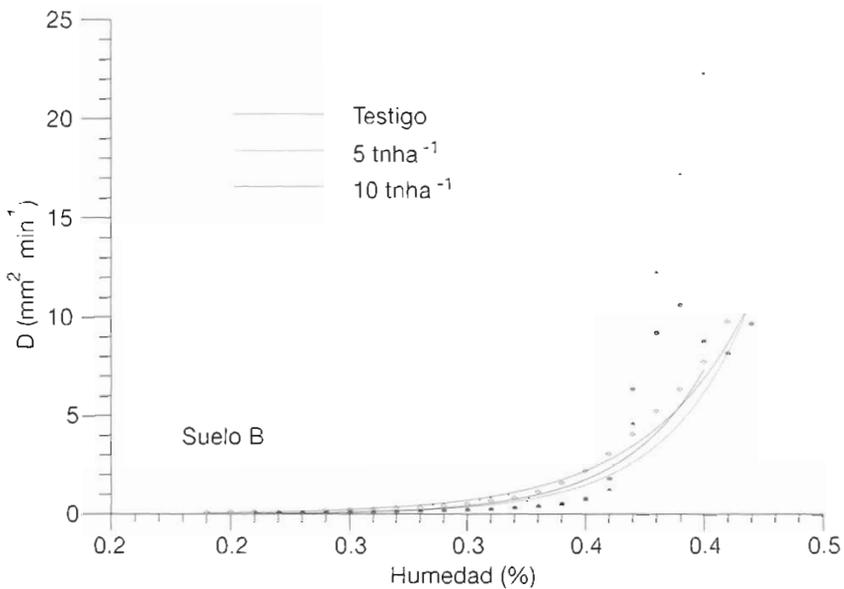


Figura 20. Relaciones entre la difusividad y la humedad, suelo B.



V. CONCLUSIONES

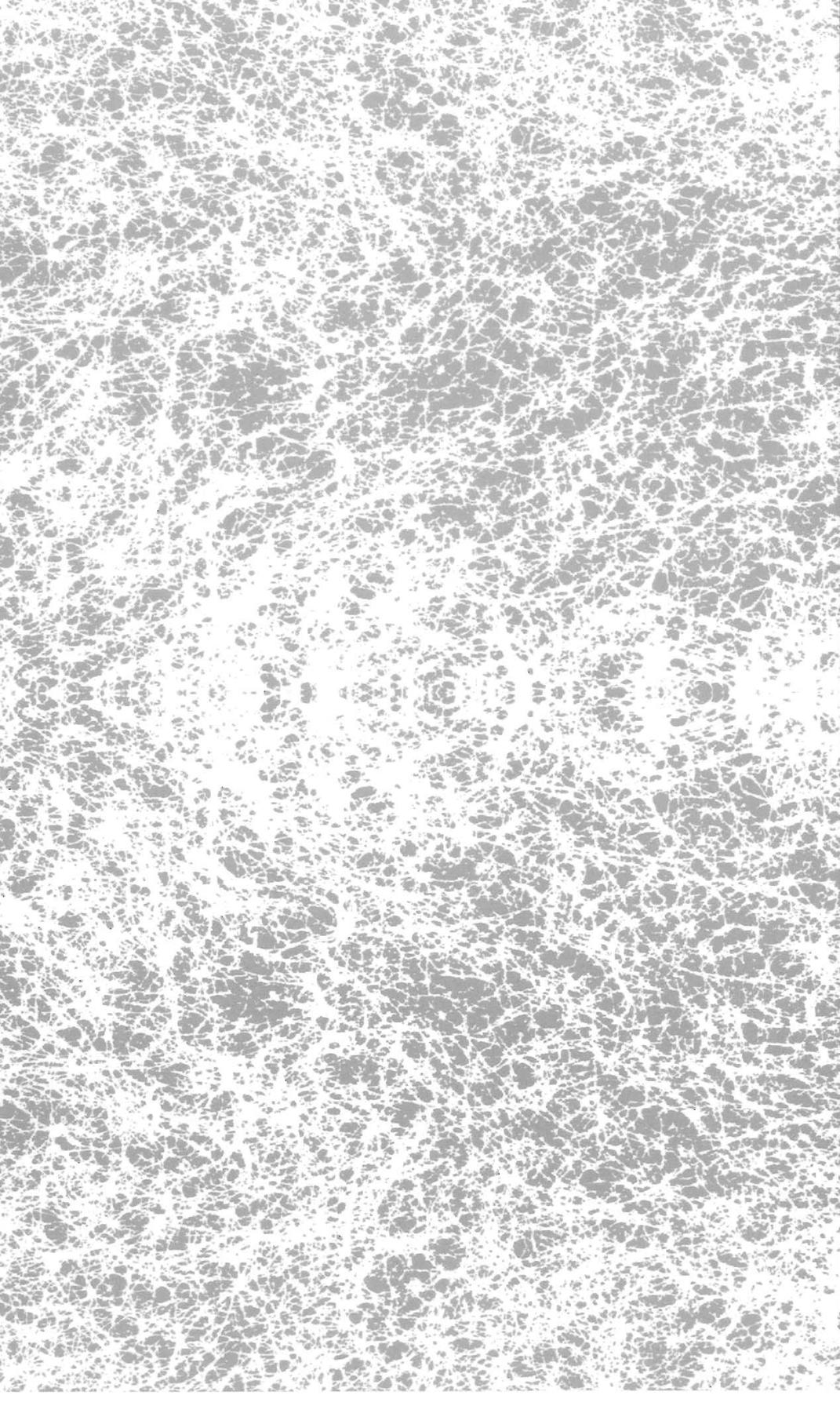
V. CONCLUSIONES.

De modo general se puede concluir que las cenizas de fangos de depuradora de aguas residuales son reusables como enmiendas de suelo. Más específicamente,

1. Las cenizas sirven como materiales mejorantes en materiales de construcción, cuando se adicionan en un porcentaje del 5%, cumpliendo las normas sobre materiales cerámicos. Aunque presentan algunos inconvenientes, hay una disminución de la resistencia a compresión, y aumenta la capacidad de absorción de agua, lo que obliga a un mayor gasto energético para desecarlas, causan una disminución de la densidad aparente y del índice de retracción, aumentando la porosidad del material obtenido, lo que resultará en un mejor aislamiento térmico y acústico.
2. Las cenizas constituyen un corrector agrícola, especialmente en suelos potencialmente endurecibles, en los que se ha observado una mejora de los parámetros físicos estudiados, reduciendo la consistencia en seco.
 - favorece la facilidad que muestran los suelos para ser trabajados, mejorando el lecho de siembra y consiguientemente la nascencia
 - crea un ambiente propicio para la formación del sistema radical
 - disminuye las pérdidas de suelo por erosión
 - aumenta la capacidad de retención de agua del suelo
 - aumenta la difusividad hidráulica, lo que supone una mayor velocidad de infiltración

Esto lleva implícito el beneficio de la retirada de un residuo que es un contaminante potencial, y en todo caso aumenta la vida útil de vertederos cuando como en el caso de Córdoba se depositan en él los lodos.

Esta Comunicación I + D es un resumen de la tesis doctoral “Aprovechamiento de cenizas de incineración de lodos de fangos de depuradora de aguas residuales”, realizada por Rafael E. Hidalgo Fernández, en el Departamento de Agronomía, de la Universidad de Córdoba, dirigida por Juan Vicente Giráldez Cervera y Jesús Ayuso Muñoz.



P.V.P.
800 Pts