



COLEGIO DE POSTGRADUADOS
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

**CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y
MICROMORFOLÓGICA DE MATERIALES
ORGÁNICOS E INORGÁNICOS PARA LA
GENERACIÓN DE MEZCLAS DE SUSTRATOS
EN LA PRODUCCIÓN DE LISIANTHUS
(*Eustoma grandiflorum*)**

ROSA ANICUA SÁNCHEZ

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

DOCTORA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2008

La presente tesis, titulada: “CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MICROMORFOLÓGICA DE MATERIALES ORGÁNICOS E INORGÁNICOS PARA LA GENERACIÓN DE MEZCLAS DE SUSTRATOS EN LA PRODUCCIÓN DE LISIANTHUS (*Eustoma grandiflorum*)”, realizada por la alumna: ROSA ANICUA SÁNCHEZ, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS

EDAFOLOGÍA

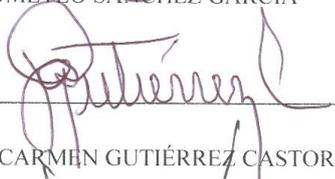
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



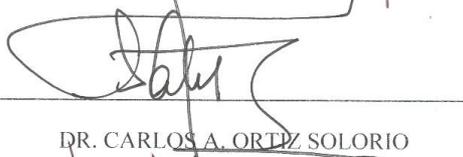
DR. PROMETEO SÁNCHEZ GARCÍA

ASESORA:



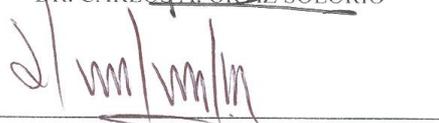
DRA. MA. DEL CARMEN GUTIÉRREZ CASTORENA

ASESOR:



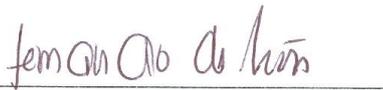
DR. CARLOS A. ORTIZ SOLORIO

ASESOR:



DR. VÍCTOR HUGO VOLKE HALLER

ASESOR:



DR. FERNANDO DE LEÓN GONZÁLEZ

ASESOR:



DR. ENRIQUE RUBIÑOS PANTA

Montecillo, Texcoco, México, julio de 2008.

RESUMEN

CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MICROMORFOLÓGICA DE MATERIALES ORGÁNICOS E INORGÁNICOS PARA LA GENERACIÓN DE MEZCLAS DE SUSTRATOS EN LA PRODUCCIÓN DE LISIANTHUS (*Eustoma grandiflorum*)

Rosa Anicua Sánchez, Dra.

Colegio de Postgraduados, 2008

La producción de cultivos en maceta está relacionada con la selección de sustratos, que se basa en las propiedades físicas y en particular con el tamaño y la distribución de partículas, que determinan la retención y el movimiento de agua. Por lo que, el objetivo del presente trabajo fue la caracterización de materiales orgánicos e inorgánicos a partir de las propiedades físicas y micromorfológicas para la generación de mezclas en la producción de Lisianthus. Se realizó la caracterización de sustratos orgánicos (fibra de coco, peat moss, composta y vermicomposta) e inorgánicos (tezontle, piedra pómez, perlita y zeolita); con base en las propiedades físicas como densidad aparente (DA) y densidad real (DR) (Ansorena, 1994); espacio poroso total (EPT), capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR) y agua difícilmente disponible (ADD) (De Boodt *et al.*, 1974) y micromorfológicas en diferentes tamaños de partícula (>3.36, 2.00, 1.00, 0.50, 0.25 y <0.13 mm); la descripción de poros y partículas se realizó mediante secciones delgadas y los criterios evaluados fueron tamaño, abundancia, forma, rugosidad de la superficie y distribución (Bullock *et al.*, 1985).

Los resultados mostraron que la forma, tamaño, empaquetamiento, porosidad interna y externa de las partículas determinan las propiedades físicas del sustrato, características que varían con el tamaño de la partícula, teniendo un comportamiento diferente en la retención y movimiento del agua.

Con base en la caracterización anterior, se seleccionaron algunos materiales como fibra de coco, peat moss, tezontle, piedra pómez y perlita para la generación de mezclas y los valores obtenidos de estas mezclas fueron para DA entre 0.09 y 0.71 g cm⁻³; DR de 0.79 a 2.36 g cm⁻³; EPT de 68 a 89%, CA de 12.46 a 49.88%, AFD de 14.94 a 50.57%, AR de 1.42 a 9.90% y ADD de 5.32 a 26.37%. Los resultados mostraron que las mezclas que tenían como componente la fibra de coco, presentaron una influencia significativa sobre las variables de respuesta en el cultivo de *Lisianthus*, además de generar un mayor ingreso neto. Cabe señalar, que la mayor eficiencia de las mezclas en cuanto a consumo de agua, no necesariamente correspondieron al mejor tratamiento, por lo que la elección de cualquier mezcla dependerá de diversos factores.

Palabras clave: sustratos, curva de retención de humedad, porosidad, *Lisianthus*, micromorfología.

ABSTRACT

PHYSICAL AND MICROMORPHOLOGICAL CHARACTERIZATION OF ORGANIC AND INORGANIC MATERIALS FOR THE GROWING MEDIA MIXTURES GENERATION IN THE PRODUCTION OF LISIANTHUS (*Eustoma grandiflorum*)

Rosa Anicua Sánchez, Dra.

Colegio de Postgraduados, 2008

The production of crops in containers is related to the selection of the growing media that is based on the physical properties and particularly with the size and the distribution of particles that determine the water retention and drainage. The main objective of this work was the characterization of organic and inorganic materials for the related to generating mixtures from different materials to produce *Lisianthus*. Several organic (coconut fiber, peat moss, compost and vermicompost) and inorganic (volcanic scoria, pumice stone, perlite and zeolite) materials were characterized and several physical properties were evaluated as particle density (Ansorena, 1994), total porosity, air capacity, easily available water, reserve water, less available water, and solid material (De Boodt *et al.*, 1974). Micromorphological properties were considered in the evaluation, the particle size distribution of the materials was from 3.36 mm, 2.00 mm, 1.0 mm, 0.5 mm, 0.25 mm to <0.13 mm; the description of pores and particles was conducted through thin sections. The parameters evaluated were size, abundance, shape, surface roughness and distribution.

The results showed that shape, size, packing, internal and external porosity of particles have an important influence on properties physical of growing media. This characteristics change whit particle size and caused a different behavior of water holding capacity and its movement.

Properties of materials was employed to select some of them (coconut fiber, peat moss, volcanic scoria, pumice stone, and perlite) from the mixes generation of them were made. The results showed that the particle density varied from 0.09 to 0.71 g cm⁻³; real density from 0.79 to 2.36 g cm⁻³; total porosity from 68 to 89%, air capacity from 12.46 to 49.88%, easily available water from 14.94 to 50.57%, reserve water from 1.42 to 9.90%, and less available water from 5.32 to 26.37%. The mixtures that had as component the coconut fiber, showed a significant influence on the answer variables in the *Lisianthus* crop, and they provide a net bigger entrance. Finally, the biggest efficiency of the mixtures for water consumption not necessarily corresponds to the best treatment, for what the election of any mixture will depend on diverse factors.

Keywords: growing media, waterrelease curve, porosity, *Lisianthus*, micromorphology.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento económico otorgado para la realización de mis estudios doctorales.

Al Colegio de Postgraduados campus Montecillo, especialmente al programa de Edafología, por brindarme la oportunidad para realizar mis estudios.

Al Instituto Rosedal Vista Hermosa y al Colegio Monteverde por brindarme la facilidad para la realización de este proyecto de vida.

Al consejo interdisciplinario que gracias a sus contribuciones en diferentes áreas como nutrición, micromorfología, física e hidrocencias hicieron posible esta investigación.

Al Dr. Prometeo Sánchez García, por compartir sus experiencias y brindarme la oportunidad de difundir este trabajo fuera de México.

A la Dra. Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena y al Dr. Carlos A. Ortiz Solorio, por guiarme en el momento preciso para desarrollar esta investigación y compartir sus conocimientos enriqueciéndome constantemente.

Al Dr. Víctor H. Volke Haller, Dr. Fernando de León González y Dr. Enrique Rubiños Panta, por sus acertados comentarios en cada etapa de este proyecto.

Al M. en C. Patricio Sánchez Guzmán, por su disponibilidad en todo momento y las facilidades otorgadas.

A la Biol. Alejandra Sánchez Saldaña, por sus sabios consejos y apoyarme incondicionalmente durante todo este tiempo.

Al personal del Laboratorio de Nutrición Vegetal; Química de suelos, Física de Suelos y Micromorfología especialmente al M. en C. Jaime Cruz; M. en C. Francisco Landeros y al Sr. Pedro Torres por todo el apoyo brindado durante el desarrollo del presente trabajo.

DEDICATORIA

A Dios por darme la dicha de existir y la satisfacción de terminar una etapa más en mi vida sin olvidarme de que siempre estas a mi lado.

A mis Padres José Anicua y Eva Sánchez por el ejemplo de vida que me han otorgado, plagado de amor, confianza, fortaleza, esfuerzo, dedicación, perseverancia, honestidad y respeto, simplemente los amo.

A mis hermanas Laura y Alicia por la compañía y sinceridad que prevalece entre nosotras, gracias por ser mis amigas incondicionales

A mis hermanos Fernando, Javier, José Antonio y Jaime por su gran apoyo y unión familiar aún en los momentos más complicados, los quiero mucho.

A mis cuñadas Remedios Hernández y Janeth Sánchez por su enorme integración en la familia.

A mis sobrinos Jerónimo, Valeria, Alejandro y los que están por venir, gracias por compartir la sonrisa de cada día y permearme de alegría con sus abrazos.

A ti David Hernández que apareciste en mi vida en un momento preciso, para mostrarme el amor verdadero, te quiero mucho.

A mis amigos incondicionales Patricia Zamora, Mary Cruz Espindola, Irma Flores, Rubén Salinas, José Luis López, David Pájaro, Patricio Sánchez, Juan Pablo Torres, Domingo García, Rubén Cuevas, Julio César Buendía y Fernando S., simplemente por compartir momentos maravillosos, los estimo profundamente.

CONTENIDO

	Página
Aprobación de la tesis	<i>ii</i>
Resumen	<i>iii</i>
Abstract	<i>iv</i>
Agradecimientos	<i>v</i>
Dedicatoria	<i>vi</i>
Contenido	<i>vii</i>
Lista de Cuadros	<i>xi</i>
Lista de Figuras	<i>xiv</i>
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Definición de sustrato	3
2.2 Tipos de sustratos	3
2.3 Estructura del sustrato	4
2.3.1 Fase sólida	4
2.3.2 Fase líquida	5
2.3.3 Fase gaseosa	8
2.4 Caracterización de sustratos	8
2.4.1 Propiedades físicas	9
2.4.1.1 Porosidad o espacio poroso total	9
2.4.1.2 Densidad aparente y real	12
2.4.1.3 Estructura	13
2.4.1.4 Granulometría o tamaño de partículas	13
2.4.2 Propiedades químicas	15
2.4.2.1 Capacidad de intercambio catiónico	15
2.4.2.2 Conductividad eléctrica y pH	16
2.4.2.3 Aporte nutrimental	17
2.4.3 Propiedades biológicas	18
2.4.4 Propiedades micromorfológicas	18
2.4.4.1 Tamaño	19
2.4.4.2 Poros	19
2.4.4.3 Formas	19

2.5 Selección de sustratos	20
2.6 Descripción de los materiales para las mezclas de sustratos	22
2.6.1 Fibra de coco o polvo de coco	22
2.6.2 Turba o Peat Moss	23
2.6.3 Composta	23
2.6.4 Vermicomposta	24
2.6.5 Tezontle	26
2.6.6 Perlita o Agrolita	26
2.6.7 Piedra pómez	26
2.6.8 Zeolita	27
2.7 Métodos para la selección de sustratos	27
2.7.1 Método de ensayo y error	28
2.7.2 Método Monte Carlo	29
2.7.3 Método de Programación lineal	31
2.8 <i>Lisianthus (Eustoma grandiflorum)</i> como especie cultivada en sustratos	32
2.9 Conclusiones de la revisión de la literatura	34
III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	36
3.1 Objetivo general	36
3.1.1 Objetivos específicos	36
3.2 Hipótesis general	37
3.2.1 Hipótesis específicas	37
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	38
4.1 Materias primas a emplear en la elaboración de mezclas de sustratos	38
4.2 Análisis físico de sustratos	38
4.2.1 Densidad aparente y porosidad	39
4.2.2 Densidad real	40
4.2.3 Retención de humedad en sustratos	40
4.2.3.1 Curvas de retención de humedad	41
4.2.4 Análisis granulométrico	41
4.3 Análisis micromorfológico	41
4.3.1 Tamaño de las partículas	42
4.3.2 Análisis de imágenes.....	42

4.4 Selección de mezclas	42
4.5. Análisis de las mezclas de sustratos	43
4.6. Preparación de las mezclas de sustratos	43
4.6.1 Esterilización y acondicionamiento de sustratos	43
4.6.2 Transplante	44
4.6.3 Manejo fitosanitario	44
4.7 Diseño de tratamientos	44
4.8 Diseño de experimental	45
4.9 Variables a evaluar en el cultivo de <i>Lisianthus (Eustoma grandiflorum)</i>	45
4.10 Análisis estadístico.....	46
4.11 Determinación de la eficiencia del agua en mezclas de sustratos para la producción de <i>Lisianthus</i>	46
4.12 Análisis económico de las mezclas de sustratos	47
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
5.1 Fibra o polvo de coco	48
5.1.1 Análisis micromorfológico	48
5.1.1.1 Porosidad	48
5.1.1.2 Partículas	54
5.1.2 Propiedades físicas	55
5.2 Turba o Peat Moss	65
5.2.1 Análisis micromorfológico	66
5.2.1.1 Porosidad	66
5.2.1.2 Partículas	71
5.2.2 Propiedades físicas	73
5.3 Composta	81
5.3.1 Análisis micromorfológico	82
5.3.1.1 Porosidad	82
5.3.1.2 Partículas	86
5.3.2 Propiedades físicas	86
5.4 Vermicomposta	90
5.4.1 Análisis micromorfológico	90

5.4.1.1 Porosidad	90
5.4.1.2 Partículas	93
5.4.2 Propiedades físicas	94
5.5 Tezontle	97
5.5.1 Análisis micromorfológico	97
5.5.1.1 Porosidad	97
5.5.1.2 Partículas	103
5.5.2 Propiedades físicas	104
5.6 Perlita o agrolita	111
5.6.1 Análisis micromorfológico	112
5.6.1.1 Porosidad	112
5.6.1.2 Partículas	116
5.6.2 Propiedades físicas	117
5.7 Piedra pómez	124
5.7.1 Análisis micromorfológico	125
5.7.1.1 Porosidad	125
5.7.1.2 Partículas	130
5.7.2 Propiedades físicas	131
5.8 Zeolita	138
5.8.1 Análisis micromorfológico	139
5.8.1.1 Porosidad	139
5.8.1.2 Partículas	143
5.8.2 Propiedades físicas	144
5.9 Selección de mezclas de sustratos	148
5.9.1. Propiedades físicas de las mezclas de sustratos	150
5.10 Producción de <i>Lisianthus (Eustoma grandiflorum)</i> en diferentes mezclas de sustratos	156
5.11 Uso eficiente del agua en diferentes mezclas de sustratos para el cultivo de <i>Lisianthus</i>	167
5.12 Análisis económico en diferentes mezclas de sustratos para la producción de <i>Lisianthus</i>	176
VI. CONCLUSIONES	180
VII. LITERATURA CITADA	182

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Características micromorfológicas de las diferentes clases de poros.....	20
Cuadro 2. Diseño de tratamientos con base a la caracterización física y micromorfológica de mezclas de sustratos	45
Cuadro 3. Tipos de poros en diferentes tamaños de partícula en fibra de coco	52
Cuadro 4. Porcentaje de ocurrencia del diámetro de poros en fibra de coco	54
Cuadro 5. Densidad aparente y real en diferentes tamaños de partícula en fibra de coco	57
Cuadro 6. Porosidad y retención de agua en diferentes tamaños de partícula en fibra de coco	60
Cuadro 7. Propiedades micromorfológicas en diferentes tamaños de partícula en peat moss	66
Cuadro 8. Porcentaje de ocurrencia del diámetro de poros en peat moss	72
Cuadro 9. Densidad aparente y real en diferentes tamaños de partícula en peat moss	75
Cuadro 10. Porosidad y retención de agua en diferentes tamaños de partícula en peat moss	76
Cuadro 11. Propiedades micromorfológicas en diferentes tamaños de partícula en composta	84
Cuadro 12. Porcentaje de ocurrencia del diámetro de poros en composta	85
Cuadro 13. Densidad aparente y real en diferentes tamaños de partícula en composta	87
Cuadro 14. Porosidad y retención de agua en diferentes tamaños de partícula en composta	87

	Página
Cuadro 15. Propiedades micromorfológicas en diferentes tamaños de partícula en vermicomposta	92
Cuadro 16. Porcentaje de ocurrencia del diámetro de poros en vermicomposta	93
Cuadro 17. Densidad aparente y real en diferentes tamaños de partícula en vermicomposta	94
Cuadro 18. Porosidad y retención de agua en diferentes tamaños de partícula en vermicomposta	95
Cuadro 19. Propiedades micromorfológicas en diferentes tamaños de partícula en tezontle	101
Cuadro 20. Porcentaje de ocurrencia del diámetro de poros en tezontle	103
Cuadro 21. Densidad aparente y real en diferentes tamaños de partícula en tezontle	105
Cuadro 22. Porosidad y retención de agua en diferentes tamaños de partícula en tezontle	108
Cuadro 23. Propiedades micromorfológicas en diferentes tamaños de partícula en perlita	115
Cuadro 24. Porcentaje de ocurrencia del diámetro de poros en perlita	116
Cuadro 25. Densidad aparente y real en diferentes tamaños de partícula en perlita	119
Cuadro 26. Porosidad y retención de agua en diferentes tamaños de partícula en perlita	122
Cuadro 27. Propiedades micromorfológicas en diferentes tamaños de partícula en piedra pómez	128
Cuadro 28. Porcentaje de ocurrencia del diámetro de poros en piedra pómez	130
Cuadro 29. Densidad aparente y real en diferentes tamaños de partícula en piedra pómez.....	132

	Página
Cuadro 30. Porosidad y retención de agua en diferentes tamaños de partícula en piedra pómez	134
Cuadro 31. Propiedades micromorfológicas en diferentes tamaños de partícula en zeolita	142
Cuadro 32. Porcentaje de ocurrencia del diámetro de poros en zeolita	143
Cuadro 33. Densidad aparente y real en diferentes tamaños de partícula en zeolita	145
Cuadro 34. Porosidad y retención de agua en diferentes tamaños de partícula en zeolita	146
Cuadro 35. Tratamientos de las diferentes mezclas de sustratos	150
Cuadro 36. Densidad aparente y real en diferentes mezclas de sustratos	152
Cuadro 37. Porosidad y retención de agua en diferentes mezclas de sustratos	155
Cuadro 38. Variables de crecimiento en plantas y flores de <i>Lisianthus</i> en diferentes mezclas de sustratos	159
Cuadro 39. Altura y peso de materia fresca y seca en raíces y parte aérea de plantas de <i>Lisianthus</i> en diferentes mezclas de sustratos a las 7 semanas	163
Cuadro 40. Peso de materia fresca y seca en raíces y parte aérea plantas de <i>Lisianthus</i> en diferentes mezclas de sustratos a las 14 semanas	165
Cuadro 41. Frecuencia de riegos en diferentes mezclas de sustratos	169
Cuadro 42. Láminas de riego promedio aplicadas para mezclas de sustrato con su respectivo drenaje y eficiencia de aplicación	171
Cuadro 43. Costos de insumos para la producción de <i>Lisianthus</i> en maceta	176
Cuadro 44. Costos de mano de obra	177
Cuadro 45. Costos de materiales usados como sustratos	177
Cuadro 46. Costos de producción para cada tratamiento de sustratos en el cultivo de <i>Lisianthus</i>	179

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Curva de liberación de agua de un sustrato (De Boodt <i>et al.</i> , 1974)	7
Figura 2. Secciones delgadas de fibra de coco en diferentes tamaños de partículas (dimensión de la sección delgada 5 x 7.5 cm)	50
Figura 3. Fibra de coco a) porosidad inter e intra partícula; b-d) forma de poros. (longitud del marco 5.3 mm LPP).....	53
Figura 4. Formas de partículas en fibra de coco (longitud del marco 5.3 mm LPP).....	55
Figura 5. Histograma de frecuencias para la distribución granulométrica en fibra de coco	56
Figura 6. Acomodamiento de partículas de acuerdo con la variedad y frecuencia de formas: a) acomodamiento más suelto, dominan partículas de diferentes formas y tamaños, b) acomodamiento denso, domina un solo tipo de partícula	59
Figura 7. Porosidad del sustrato: a) macroporos generados por partículas gruesas; b) microporos por partículas finas y c) mezcla de ambos (los cilindros de la parte inferior contienen el mismo peso y ejemplifican el volumen que ocuparían según la porosidad que representan)	61
Figura 8. Curva de liberación de agua para fibra de coco en diferentes tamaños de partícula	64
Figura 9. Peat moss de <i>Sphagnum</i> , identificado por su estructura porosa abierta de las células de sus hojas. a) planta, b) hoja y c) estructura interna de la hoja (modificado por Peck, 1984)	67
Figura 10. Secciones delgadas de peat moss en diferentes tamaños de partículas (dimensión de la sección delgada 5 x 7.5 cm)	69
Figura 11. Peat moss: a) porosidad inter e intra partícula, b-f) forma de poros y tipos de partícula (longitud del marco 5.3 mm LPP)	70
Figura 12. Histograma de frecuencias para la distribución granulométrica en peat moss	73

	Página
Figura 13. Diagrama que representa las fuerzas de cohesión y adhesión	79
Figura 14. Relación entre agua fácilmente y difícilmente disponible y tamaño de partícula en peat moss	80
Figura 15. Curva de liberación de agua para peat moss en diferentes tamaños de de partícula	81
Figura 16. Secciones delgadas de composta en diferentes tamaños de partículas (dimensión de la sección delgada 5 x 7.5 cm)	83
Figura 17. Composta: Porosidad inter e intra partícula y forma de poros (longitud del marco 5.3 mm LPP).....	85
Figura 18. Histograma de frecuencias para la distribución granulométrica en composta	86
Figura 19. Relación entre porosidad total y tamaño de partícula en composta	88
Figura 20. Relación entre agua fácilmente y difícilmente disponible con el tamaño de partícula en composta	89
Figura 21. Curva de liberación de agua para composta en diferentes tamaños de partícula	90
Figura 22. Secciones delgadas de vermicomposta en diferentes tamaños de partículas (dimensión de la sección delgada 5 x 7.5 cm)	91
Figura 23. Vermicomposta: Porosidad inter e intra partícula y forma de poros. (longitud del marco 5.3 mm LPP)	93
Figura 24. Histograma de frecuencias para la distribución granulométrica en vermicomposta	94
Figura 25. Relación entre el agua difícilmente disponible y el tamaño de partícula en vermicomposta	96
Figura 26. Curva de liberación de agua para vermicomposta en diferentes tamaños de partícula	96
Figura 27. Secciones delgadas de tezontle en diferentes tamaños de partículas (dimensión de la sección delgada 5 x 7.5 cm)	98

	Página
Figura 28. Tezontle: a) porosidad inter e intra partícula, b-c) forma de poros (longitud del marco 5.3 mm LPP) y d) forma de poros (longitud del marco de 2.9 mm LPP)	99
Figura 29. Forma de partículas en tezontle (longitud del marco 5.3 mm LPP)	103
Figura 30. Histograma de frecuencias para la distribución granulométrica en tezontle	104
Figura 31. Relación entre la densidad real y el tamaño de partícula en tezontle	106
Figura 32. Relación entre la porosidad total y el tamaño de partícula en tezontle ...	109
Figura 33. Curva de liberación de agua para tezontle en diferentes tamaños de partícula	111
Figura 34. Secciones delgadas de perlita en diferentes tamaños de partículas (dimensión de la sección delgada 5 x 7.5 cm)	113
Figura 35. Perlita: a) forma de poros, b) porosidad inter e intra partícula (longitud del marco 5.3 mm LPP)	114
Figura 36. Formas de partículas en perlita (longitud del marco 5.3 mm LPP)	117
Figura 37. Histograma de frecuencias para la distribución granulométrica en perlita	118
Figura 38. Relación entre densidad aparente y el tamaño de partícula en perlita	119
Figura 39. Relación entre densidad real y el tamaño de partícula en perlita	120
Figura 40. Relación entre la capacidad de aire y el tamaño de partícula en perlita ...	123
Figura 41. Curva de liberación de agua para perlita en diferentes tamaños de partícula	124
Figura 42. Secciones delgadas de piedra pómez en diferentes tamaños de partícula (dimensión de la sección delgada 5 x 7.5 cm)	126

	Página
Figura 43. Piedra pómez: a) forma de poros. b) porosidad inter e intra agregado (longitud del marco 5.3 mm LPP) c-d) forma de poros (longitud del marco de 1 mm LPP)	127
Figura 44. Formas de partículas en piedra pómez (longitud del marco 5.3 mm LLP)	131
Figura 45. Histograma de frecuencias para la distribución granulométrica en piedra pómez	131
Figura 46. Relación entre densidad real y el tamaño de partícula en piedra pómez ..	134
Figura 47. Curva de liberación de agua para piedra pómez en diferentes tamaños de partícula	137
Figura 48. Difractograma correspondiente a zeolita	138
Figura 49. Estructura de zeolita tipo Faujasita	139
Figura 50. Secciones delgadas de zeolita en diferentes tamaños de partículas (dimensión de la sección delgada 5 x 7.5 cm)	140
Figura 51. Zeolita: a) porosidad inter e intra partícula, b) forma de poros. (longitud del marco 5.3 mm LPP)	141
Figura 52 . Formas de partículas en zeolita (las figuras a-c tienen una longitud del marco 5.3 mm y la d de 1mm LPP)	144
Figura 53. Histograma de frecuencias para la distribución granulométrica en zeolita	144
Figura 54. Curva de liberación de agua para zeolita en diferentes tamaños de partícula	147
Figura 55. Curva de liberación de agua en diferentes mezclas de sustratos	156
Figura 56. Altura de plantas de <i>Lisianthus</i> en diferentes mezclas de sustratos	158
Figura 57. Botones florales, número y diámetro de flores en el cultivo de <i>Lisianthus</i>	160

	Página
Figura 58. Crecimiento de <i>Lisianthus</i> en diferentes mezclas de sustratos: a) mezclas con fibra de coco, b) mezclas con peat moss y c) comparación entre mezclas de fibra de coco y peat moss	161
Figura 59. Desarrollo radical en diferentes tamaños de partícula del sustrato: a) desarrollo radical en MIT1 (fibra de coco + tezontle a granel) y b) MIT3 (fibra de coco + tezontle con tamaño de partícula de 1 mm)	162
Figura 60. Desarrollo de plantas de <i>Lisianthus</i> en diferentes mezclas de sustrato a .. las siete semanas.....	164
Figura 61. Distribución radical y aérea en plantas de <i>Lisianthus</i> en diferentes mezclas de sustratos	166
Figura 62. Efecto de las mezclas de sustratos sobre el número de riegos, altura de la planta y botones florales en <i>Lisianthus</i>	172
Figura 63. Conductividad eléctrica inicial y final en diferentes mezclas de sustrato para el cultivo de <i>Lisianthus</i>	174
Figura 64. pH inicial y final en diferentes mezclas de sustrato para el cultivo de <i>Lisianthus</i>	175

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el incremento en la demanda de sustratos ha producido un clima de creciente sensibilidad hacia el agotamiento de los recursos no renovables y el deterioro ambiental, lo cual ha favorecido el aprovechamiento de diversos materiales, que hasta la fecha son considerados como residuos orgánicos no deseables o subproductos de escaso valor. En México existen diversos materiales con diferentes propiedades físicas y químicas como la piedra pómez, el tezontle, la fibra de coco, la zeolita y las pajas de cereales, entre otros, que requieren investigación. Se sabe que las diferentes características de los componentes de un sustrato, pueden proporcionar una medida de lo complejo que puede resultar predecir las propiedades de las mezclas; por lo tanto, se debe tener presente que estas son el resultado de la interacción entre sus componentes.

En la producción de plantas en macetas, difícilmente se utilizan materiales únicos como sustratos, ya que no siempre satisfacen las necesidades del cultivo en cuanto a aireación, retención de agua, fertilidad, etc. En el caso de los sustratos comerciales, consisten de una mezcla de distintas proporciones de materiales que aparentemente aportan las características necesarias para el desarrollo de los cultivos. Sin embargo, pocas veces indican el tipo y granulometría que deben tener, por lo que se desconocen sus propiedades físicas. El estudio de los sustratos se debe enfocar de acuerdo con sus características hídricas y granulométricas, debido a que el cultivo puede tener diferentes tasas de transpiración, por lo que serán distintos en cuanto a retención de agua, y convenientemente, los tipos de manejo. Debido a lo anterior, la optimización de los costos o eficiencia de los materiales, resulta más complicado para determinar las mezclas de sustratos.

Más aún se observa, que la selección de sustratos en la mayoría de los casos tiene una influencia directa sobre la calidad de la producción, y para valorarla no basta con conocer las propiedades generales de sus principales componentes, sino que es necesario determinarlas, ya que estas varían en gran medida en función al origen de los materiales, condiciones de extracción, granulometría, aireación, acidez y contenido de nutrientes, entre otras propiedades.

El manejo tecnológico desarrollado en cultivos comerciales de especies ornamentales incluye el uso de un sustrato complejo y una rutina de fertilización. La aplicación de diferentes alternativas de manejo es el resultado de la información extrapolada de países tecnológicamente más desarrollados y la experiencia de cada asesor/productor. El paso decisivo para determinar si un material es adecuado para ser utilizado como sustrato, es el estudio de las propiedades físicas y micromorfológicas; aun cuando se han realizado varios trabajos de investigación en México, en la mayoría no se realiza la caracterización de los materiales y en los que se hace se observa una gran variabilidad en los métodos empleados.

De acuerdo con lo anterior, surge la necesidad de realizar la caracterización de materiales orgánicos e inorgánicos que se usan como sustratos, lo cual facilitará la obtención de mezclas a partir de las propiedades físicas y micromorfológicas de los mismos, así como también conocer el efecto de la nutrición en sustratos para la producción de plantas de *Lisianthus (Eustoma grandiflorum)* bajo condiciones de invernadero.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Definición de sustrato

Un sustrato es un material sólido natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, que colocado en un contenedor, en estado puro o en mezcla, permite el anclaje del sistema radical y desempeña una función de soporte para la planta, pudiendo intervenir o no en el proceso de nutrición mineral de la misma (Noguera, 1997).

2.2 Tipos de sustratos

Existen diferentes criterios de clasificación de los sustratos, con base en el origen de los materiales, naturaleza, propiedades y capacidad de degradación.

Noguera (1997) clasificó la utilización de sustratos en la horticultura de acuerdo con sus propiedades en: a) sustratos químicamente inertes como: arena granítica o silícea, grava, roca volcánica, perlita, arcilla expansible, lana de roca, etc. y b) sustratos químicamente activos como: turbas rubias y negras, corteza de pino, vermiculita, materiales lignocelulósicos, etc., y señala que las diferencias entre ambos están determinadas por la capacidad de intercambio catiónico o la capacidad de almacenamiento de nutrientes por parte del sustrato. Los sustratos químicamente inertes actúan como soporte de la planta y no intervienen en el proceso de adsorción y fijación de nutrientes, mientras que los sustratos químicamente activos actúan como depósitos de reserva de los nutrientes aportados mediante la fertilización, almacenándolos o cediéndolos según las exigencias del cultivo.

Otra clasificación es de acuerdo con el origen del material en orgánicos e inorgánicos: Materiales orgánicos se subdividen: a) de origen natural, que se caracterizan por estar sujetos a descomposición biológica (turbas o peat moss); b) de síntesis, son polímeros orgánicos no biodegradables, que se obtienen mediante síntesis química (espuma de poliuretano, poliestireno expandido, etc.); c) subproductos y residuos de diferentes actividades agrícolas, industriales y urbanas como cascarillas de arroz, pajas de cereales, fibra de coco, orujo de uva, cortezas de árboles, aserrín y virutas de la madera, residuos sólidos urbanos, lodos de

depuración de aguas residuales, etc., la mayoría de los materiales de este grupo deben experimentar un proceso de compostaje para su adecuación como sustratos. Materiales inorgánicos o minerales se subdividen: a) de origen natural, como arena, grava, tierra volcánica, etc. que se obtienen a partir de rocas o minerales de diversos orígenes y modificados de modo ligero, mediante tratamientos físicos sencillos como arenas, grava, tezontle y piedra pómez; b) transformados o tratados (perlita, lana de roca, vermiculita, arcilla expandida, etc.) mediante tratamientos físicos a partir de rocas o minerales, más o menos complejos, en donde se modifican notablemente las características de los materiales de partida; y c) residuos y subproductos industriales, comprende los materiales procedentes de actividades industriales (escorias de horno alto, estériles del carbón, etc.) (Noguera, 1997).

2.3 Estructura del sustrato

Un sustrato es un sistema formado por tres fases: sólida, constituida por las partículas; líquida, conformada por el agua que contiene sustancias disueltas y gaseosa, que es el aire del sustrato; muchas veces resulta imposible separar estas tres fases. Para entender las propiedades de los sustratos y sus repercusiones es necesario considerarlo como un sistema de matriz sólida/porosa, de forma análoga al que se utiliza en edafología para definir a los suelos en forma natural. La diferencia básica respecto a los suelos naturales radica en composición distinta de la matriz sólida, que a su vez genera una configuración de poros diferentes en ambos casos (Ansorena, 1994).

2.3.1 Fase sólida

La estructura física de un sustrato está formada básicamente por un esqueleto sólido que conforma un espacio de poros, que pueden estar llenos de agua o de aire, y que corresponden a espacios situados entre las partículas del sustrato o dentro de las mismas. El esqueleto sólido y el espacio poroso de los sustratos están definidos por la naturaleza del material y por el tipo de empaquetamiento; lo cual dependerá del tipo de material y de su distribución granulométrica como: tamaño de las partículas, mezclado e isotropía (igualdad de las propiedades físicas en todas las direcciones) del empaquetamiento o configuración espacial. Bajo este razonamiento, un mismo material podrá tener distintas propiedades en función al tamaño de partículas y del estado de empaquetamiento de las mismas; si a eso

además se agregan las características distintivas de los propios materiales, resulta un sistema muy complejo, con propiedades interrelacionadas de difícil caracterización (Verdonck *et al.*, 1984). Las características del material que pueden otorgar propiedades específicas en un sustrato son: composición, masa, densidad, estructura interna, forma, características superficiales y tamaño de partículas (Handreck, 1983). La combinación de la estructura (agregación de partículas) generada por las partículas del sustrato en el espacio y las características del material como: la composición elemental y la estructura interna están determinadas por las propiedades físicas y químicas de un sustrato.

La composición elemental y la forma de fijar los elementos a la matriz del material establecen el contenido de nutrientes, elementos fitotóxicos, como metales pesados y la capacidad de intercambio iónico, así como también el pH, la capacidad amortiguadora y el contenido de sales del sustrato que se derivan de la actividad química de los materiales (Ansorena, 1994). La estructura interna de las partículas del material determina la porosidad interna y la densidad real; la granulometría y el tipo de empaquetamiento establecen la distribución de tamaños de poros interparticulares. La densidad aparente, es función de la distribución espacial y de la estructura interna del material, en tanto que la porosidad es la suma de los poros internos y externos y de ella dependen las propiedades hídricas del sustrato, como la retención de agua y permeabilidad. Existen factores que, desde el punto de vista físico distinguen a los sustratos de los suelos naturales, como la porosidad, puesto que la mayoría de los materiales que se utilizan como sustratos tienen poros dentro y entre partículas, lo que permite aumentar o disminuir el espacio poroso (Adler, 1992).

2.3.2 Fase líquida

La fase líquida requiere de una especial atención debido a la disponibilidad de agua para las plantas, sirve de soporte a la solución nutritiva, y su conocimiento desde el punto de vista energético e hidráulico permite de un modo práctico establecer las dosis de fertilizante y las frecuencias de riego (Ansorena, 1994).

El tamaño de los poros condiciona la aireación y la retención de agua del sustrato; los poros gruesos tienen una menor relación superficie/volumen, por lo que el equilibrio, tensión

superficial/fuerzas gravitacionales se restablecen cuando el poro queda solo parcialmente lleno de agua, formando una película de espesor determinado. El equilibrio aire/agua se representa gráficamente mediante las curvas de retención de humedad. Se parte de un volumen único saturado de agua y en el eje de ordenadas se representa el porcentaje del volumen de material sólido más el volumen de porosidad útil; se somete a presiones de succión creciente, expresadas en centímetros de columnas de agua (cm de c. a.), y se colocan en el eje de las abscisas. A cada succión corresponde una extracción de agua, cuyo volumen es reemplazado por el equivalente de aire; de modo que a un valor de abscisas corresponde una ordenada de valor igual al volumen del material sólido, más el volumen del aire. El volumen restante hasta 100% se relaciona al agua que aún retiene el sustrato (De Boodt *et al.*, 1974; Verdonck *et al.*, 1984; Ansorena, 1994).

En los sustratos se utiliza el término capacidad de contenedor, que se define como la cantidad de agua retenida por el sustrato alojado en una maceta, una vez que ha sido saturado con agua y dejado drenar libremente. Sin embargo, no es suficiente que un sustrato posea una elevada capacidad de contenedor, ya que sólo una parte del agua retenida en estas condiciones es disponible para las plantas. La humedad de algunos materiales, como el peat moss y las cortezas de árboles deben alcanzar un valor mínimo para que pueda mezclarse y humedecerse convenientemente (30%); una vez en la maceta, las propiedades de retención de agua del sustrato pueden sufrir una pérdida irreversible si se seca excesivamente (Ansorena, 1994).

De Boodt *et al.* (1974) desarrollaron la curva de liberación de agua para sustratos, fijando los límites de ésta curva entre 0 y 100 cm de tensión (cm de columna de agua) (Figura 1) y clasificaron el agua en el sustrato como:

- a) Agua difícilmente disponible (ADD): es el porcentaje de agua en volumen, que queda retenida en el sustrato tras aplicar una tensión de 100 cm de columna de agua (10 Kpa).
- b) Agua de reserva (AR): es el porcentaje en volumen de agua que se libera entre 50 y 100 cm de columna de agua de tensión sobre el sustrato (entre 5 y 10 Kpa).

- c) Agua fácilmente disponible (AFD): es el porcentaje en volumen de agua que se libera entre 10 y 50 cm de columna de agua de tensión sobre el sustrato (entre 1 y 5 Kpa).
- d) Capacidad de aireación (CA): es el porcentaje en volumen de agua que se libera al aplicar una tensión de 10 cm de columna de agua.
- e) Material sólido (MS): es el porcentaje en volumen ocupado por la matriz sólida del sustrato.
- f) Espacio poroso total (EPT): es el espacio de aire y agua, formado por la suma de ADD, AR, AFD y CA que se determina a partir de las densidades real y aparente.

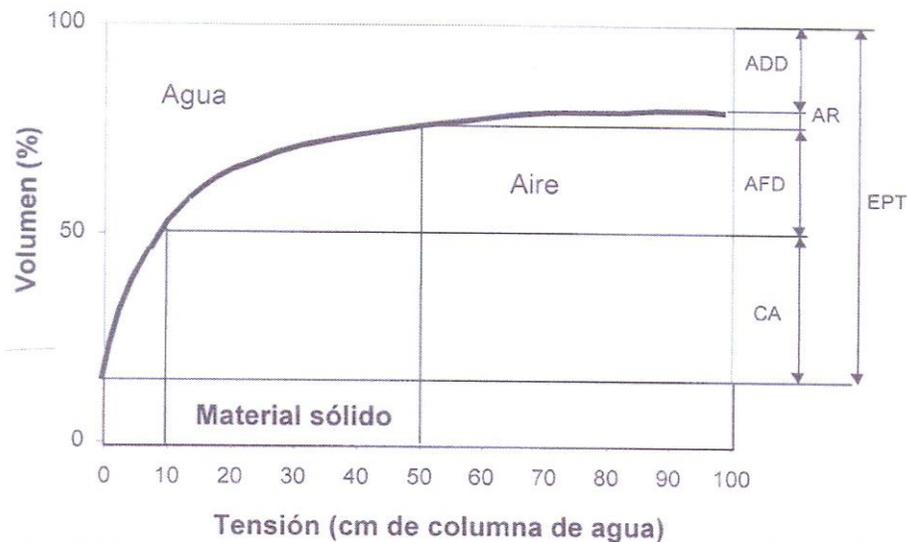


Figura 1. Curva de calibración de agua de un sustrato (De Boodt *et al.*, 1974).

Es importante mencionar, que muchos sustratos pierden la mayor parte de agua a tensiones muy bajas, inferiores a 50 cm de columna de agua. La retención de humedad es una de las principales características que debe tener un sustrato. De Boodt y Verdonck (1972) y Abad *et al.* (1993) mencionaron valores ideales para sustratos, por ejemplo de agua fácilmente disponible entre 20 y 30% y agua de reserva de 4 a 10%; mientras que Handreck y Black (1991) indicaron que el agua fácilmente disponible debe ser mayor al 20% y Bunt (1988) y Abad *et al.* (1993) establecieron valores de agua total disponible entre 24 y 40%.

2.3.3 Fase gaseosa

Además de agua, las raíces de las plantas necesitan un suministro de aire para mantener su metabolismo y crecimiento. De todos los poros existentes en el sustrato, el agua ocupa los más pequeños, mientras que los poros de mayor tamaño están ocupados por la fase gaseosa. Por lo tanto, cualquier acción que reduzca el tamaño de los poros más grandes, disminuirá la proporción de aire del medio. Esto es lo que ocurre con la compactación, ya que al presionar el sustrato disminuye el tamaño de los poros grandes reduciéndose el volumen de aire disponible y aumentando la cantidad de agua retenida, lo que puede llegar a limitar el crecimiento de las plantas (Howard, 1979), ya que los grandes poros están directamente relacionados con el tamaño de las partículas, su arreglo y la compactación de los materiales (Mastalerz, 1977).

La capacidad de aireación en los sustratos es diferente. Abad *et al.* (1993) mencionaron valores entre 10 y 30%; Handreck y Black (1991) entre 7 y 50%; Bunt (1988) sugiere valores entre 10 y 20% y finalmente, De Boodt y Verdonck (1972) indicaron intervalos entre 20 y 30%. Estos valores dependerán del tipo de material y el tamaño de partícula con la que se trabaje, ya que un cierto grado de compactación del sustrato se produce inevitablemente de manera natural durante el desarrollo del cultivo, como consecuencia del riego y las prácticas de manejo.

2.4 Caracterización de sustratos

El sustrato ideal depende de una gran cantidad de factores y probablemente sea complicada su elaboración, ya que puede dar resultados distintos según las circunstancias que lo afectan como el clima y microclima, las técnicas culturales, la duración del cultivo o el destino final de las plantas, entre otros. Aunque el conocimiento de estas condiciones no permite establecer la composición del sustrato, sí predice las características que deberá tener para que se adecue a ellas (Burés *et al.*, 1988).

En la caracterización de sustratos se suelen distinguir varios tipos de propiedades: físicas, químicas, biológicas y recientemente micromorfológicas. La importancia del conocimiento de estas propiedades radica en que de ellas dependerá el manejo adecuado de la

fertilización y del riego y, por lo tanto, el éxito en la producción. Es evidente que para poder garantizar un cultivo, el sustrato debe mantenerse como un factor fijo, es decir, que sus propiedades físicas, químicas y biológicas sean siempre las mismas, con la finalidad de poder establecer un manejo adecuado; esto implica que se deben conocer las propiedades de los sustratos (Reinikainen, 1993).

2.4.1 Propiedades físicas

Generalmente suele darse más importancia a las propiedades físicas de los sustratos, ya que una vez seleccionada una mezcla, apenas puede modificarse su estructura física, a diferencia de su composición química, que puede ser alterada durante el desarrollo de la planta, mediante el riego y la fertilización. Para cumplir correctamente sus funciones de regulación del suministro de agua y aire, los sustratos deben poseer una elevada porosidad y capacidad de retención de agua, unidos a un drenaje rápido y una buena aireación. La estructura física de un sustrato está formada por un esqueleto sólido intercalado con espacios vacíos o poros, que pueden estar llenos de agua o aire (Burés *et al.*, 1988).

Ansorena (1994) mencionó que las propiedades físicas que permiten evaluar la capacidad de un material como sustrato, o comparar diferentes materiales, son: distribución del tamaño de partículas o granulometría y porosidad (capacidad de retención de agua y aire).

2.4.1.1 Porosidad o espacio poroso total

La porosidad de un sustrato es el porcentaje de su volumen que no se encuentra ocupado por partículas sólidas, es decir, el cociente entre el volumen de poros (aire o agua) y el volumen total que el sustrato ocupa en la maceta (Handreck y Black, 1984; Blake, 1986).

La porosidad varía en un amplio intervalo de valores, desde 30% en suelos compactados hasta cifras del orden de 95% en peat moss; cabe señalar que el valor óptimo que se recomienda es entre 80 y 85% (De Boodt y Verdonck, 1972; Verdonck *et al.*, 1984; Bunt, 1988; Abad *et al.*, 1993; Ansorena, 1994). Es importante mencionar, que las recomendaciones en relación a la cantidad total y tipo de espacios porosos en los sustratos varían considerablemente. Handreck y Black (1984) reportaron que un sustrato bien formulado

contiene alrededor de 60 y 80% de porosidad total. Debido a la alta variabilidad en las recomendaciones de porosidad, se observan reflejados diferentes tipos y formas en que la porosidad puede ser medida. Beardsell *et al.* (1979) encontraron que la porosidad total puede ser predicha a partir de la densidad en volumen para ciertos sustratos, mientras que las propiedades de aireación y de retención de humedad no pueden ser determinadas fácilmente.

Los sustratos tienen dos tipos de porosidad: interna y externa. La externa, se genera por el empaquetamiento de las partículas, y la interna depende de la naturaleza de las mismas, estado e interconexión de los poros. Esta última puede ser abierta o cerrada; los poros abiertos son los que tienen conexión con el sistema de poros externos y también se denominan poros percolantes (Bullock *et al.*, 1985; Ansorena, 1994) y los poros cerrados o no percolantes son los que no tienen conexión con el sistema de poros externos. La porosidad efectiva es la porosidad percolante, abierta o interconectada, que es la que contribuye a la retención y movimiento del agua en el sustrato, mientras que la porosidad ocluida, al no estar en contacto con el espacio abierto, no sufre intercambio de fluidos con él y por tanto no sirve como almacén para la raíz (Lemaire, 1995). El espacio o volumen útil de un sustrato corresponderá a la porosidad abierta. Gras (1982) obtuvo una porosidad efectiva de 81.3% para una muestra de perita o agrolita cuya porosidad total era de 94.9%, por lo que el volumen de poros cerrados llegaba a ser de 13.6%, en lo cual coincidía con Bunt (1984) para el mismo material de grano fino (96.6 y 86.48%, respectivamente).

A nivel de micromorfología los poros se dividen en poros de empaquetamiento simple, cuando solo se presentan partículas de arena y tienen una función percolante; de empaquetamiento compuesto cuando se presentan solo agregados granulares y migajosos, con una función percolante y de almacén y los de empaquetamiento complejo, en donde ocurren tanto arenas como agregados. Este último sistema de poros es el que se crea en los sustratos; sin embargo, se tiene poca información cuantitativa. También existe la clasificación de los poros con base en su forma (vesículas, canales, cavidades que generalmente corresponden a los internos que pueden ser abiertos o interconectados); posición (entre las partículas- inter particular- y dentro de las partículas -intra particular-); a través de las partículas (trans

particular) y dentro de los materiales no agregados (Bullock *et al.*, 1985), por eso es importante la granulometría o tamaño de partículas en las propiedades físicas de los sustratos.

Los sustratos, a excepción de algunos de origen sintético, suelen estar formados por la mezcla de partículas (corteza, arena, etc.) o fibras (turbas, lana de roca) de diferentes tamaños. Hasta ahora, sólo se han considerado los poros que quedan entre las partículas de los materiales que constituyen el sustrato. Además de éstos, los propios granos o fibras tendrán poros internos, que podrán estar conectados con el exterior o estar cerrados. Estos últimos no serán efectivos, ya que las raíces no tendrán acceso a ellos, y por lo tanto no podrán tomar el agua o aire que contengan. Si la retención de agua de un sustrato es elevada, puede ocurrir que se encuentre adsorbida en los microporos con una fuerza superior a la succión que la planta es capaz de ejercer, por lo que no se encontrará disponible, ya que ésta, dependerá del tamaño de microporos y de la concentración de sales en la solución acuosa. Sin embargo, la proporción de macroporos con relación a los microporos, varían considerablemente entre diferentes mezclas de sustratos (Puustjarvi y Robertson, 1975).

En consecuencia, la porosidad total de un sustrato será la suma de los espacios entre las partículas y las procedentes de los poros internos de dichas partículas, siendo normalmente estos poros más pequeños que los espacios. Como se mencionó, no toda la porosidad será útil, ya que debido a la existencia de poros cerrados, sólo una parte de la porosidad total será efectiva o disponible para las raíces de la planta. La perlita o agrolita es un ejemplo típico de estos materiales en los que, a causa de la existencia de poros cerrados, su porosidad efectiva es inferior a la total. La turba negra (peat moss) tiene una porosidad de 88 y 92%, la perlita de 96.4% y la corteza de árbol de 85% (Lamaire *et al.*, 1993). Otro ejemplo, de poros internos de tipo cavidad son los del tezontle, que tienen poca conducción entre ellos, por lo que este material solo contribuye a la percolación del agua.

Sin embargo, la pómez con vesículas son una excepción. Segura (2003) realizó un trabajo con gravas de pómez redondeadas, las cuales presentaron de 30 a 45% de poros vesícula de diferentes diámetros y forma tubular dominando los de 25 μm (70%); por este tipo de características, los poros pueden actuar como fuerzas capilares y son los responsables de la

retención de humedad al permitir el almacenamiento del agua y evitar la pérdida rápida por evaporación y también menciona que el tamaño influye en la capacidad de retención de humedad, por ejemplo, las partículas de tamaño lapilli (entre 2 y 6 mm) son las que se saturan y conservan más la humedad a diferencia de las cenizas (<2 mm) y las bombas (>6 mm).

En teoría, al disminuir el volumen total, se mantiene la masa del material y aumentará la densidad aparente. La reducción del tamaño de los poros que se produce al aumentar la compactación hace que disminuya la porosidad ocupada por el aire y aumente la retención del agua, la cual ejerce un efecto de compactación sobre los sustratos en maceta, que deberá tomarse en cuenta.

2.4.1.2 Densidad aparente y real

La densidad aparente (DA) se define como la relación entre la masa de una muestra seca y el volumen del sustrato húmedo (Bunt, 1988). La densidad aparente de los sustratos va desde 0.03 hasta 0.8 g cm⁻³, donde las densidades más bajas corresponden a los sustratos orgánicos (Abad y Noguera, 1998). Abad *et al.* (1993) mencionaron densidades para sustratos mayores de 0.4 g cm⁻³; mientras que Handreck y Black (1991) indicaron densidades entre 0.3 y 0.6 g cm⁻³ en diferentes tamaños de partícula, reportando valores aproximados de densidad aparente y granulometría de algunos materiales utilizados en las mezclas de sustratos: 0.1 g MS/mL en peat moss, 0.21 g MS/mL en agrolita de 2 a 5 mm, 0.12, 0.21 y 0.30 g MS/mL para corteza de pino de 2 a 5 mm, 0.5 a 1 mm y menores a 0.5 mm, respectivamente, y arenas 1.28 g MS/mL de 0.5 a 1mm, y observaron un efecto del tamaño de partícula en la densidad aparente, ya que al aumentar el tamaño, la densidad aparente disminuye.

Es importante considerar, que la densidad aparente es variable debido al tipo de sustrato; por ello si la finalidad es la producción en plantas en maceta, la densidad aparente debe ser superior de 0.5 g cm⁻³ (Abad, 1995); esto evitará que las plantas sean volteadas por el viento; otra característica que es importante considerar son los costos de transporte que representa una DA alta y manejo del sustrato.

La densidad real (DR) es el cociente entre la masa de las partículas del medio de cultivo y el volumen que ocupan, sin considerar los poros y los huecos (Ansorena, 1994). Esta propiedad tiene un interés relativo y su valor varía según el material del que se trate que suele oscilar entre 2.5 y 3 g cm⁻³ para la mayoría de materiales de origen mineral.

2.4.1.3 Estructura

Puede ser granular o bien fibrilar; la primera no tiene forma estable como la de la mayoría de los sustratos minerales, y se acopla fácilmente a la forma del contenedor; mientras que la segunda depende de las características de las fibras, si son fijadas por algún tipo de material de cementación, conservan formas rígidas y no se adaptan al recipiente; además pueden tener cierta facilidad de cambio de volumen y consistencia si pasan de secas a mojadas (Ansorena, 1994).

2.4.1.4 Granulometría o tamaño de partículas

La granulometría de un sustrato se refiere a la proporción que guardan los diferentes tamaños de partículas que lo componen. Los sustratos están constituidos por mezclas de partículas de diferentes tamaños, desde muy pequeñas hasta muy grandes; es decir, existe una distribución de tamaños de partícula. Esta suele representarse gráficamente, como una curva que asigna a cada tamaño de partícula el porcentaje en peso de partículas de ese tamaño (histogramas de frecuencias). En micromorfología se demostró que con partículas de igual tamaño las orgánicas se acomodan entre las arenas, reduciendo el espacio poroso. Las partículas pequeñas se alojan en los huecos entre partículas grandes, reduciendo su tamaño y, por lo tanto, la porosidad total y la ocupada por el aire. Al mismo tiempo, aumentan la cantidad de agua retenida, al ser mayor el número de microporos. En consecuencia, las propiedades físicas de los sustratos dependen en gran medida de la distribución del tamaño de las partículas, por lo que modificando o seleccionando adecuadamente esta última pueden conseguirse las propiedades óptimas (Ansorena, 1994).

El tamaño de los gránulos o fibras condiciona el comportamiento del sustrato, ya que además de su densidad aparente varía su comportamiento hídrico a causa de su porosidad externa, que aumenta de tamaño de poros conforme mayor sean las partículas (Handreck y

Black, 1994). Handreck (1983) estudió mezclas basadas en corteza de pino, concluyendo que la fracción menor que 0.5 mm y en particular la que se encuentra en intervalos entre 0.1 y 0.25 mm presentaron la máxima influencia en la porosidad de aire y en la retención de agua. En contraste, Daniels (1988) mencionó que la influencia del tamaño de partícula en las propiedades químicas del sustrato no parece estar clara.

La granulometría de los materiales empleados como sustratos suele ser muy variable, dependiendo de múltiples factores como: origen y naturaleza, sistema de recolección empleado, condiciones de trituración y tamizado, por ejemplo en el caso del peat moss, el tamaño de partícula disminuye al aumentar el grado de descomposición. También influye el sistema de recolección empleado; el de molienda produce partículas muy finas, que taponan los poros grandes y disminuye la aireación del sustrato, lo cual no ocurre cuando se recolecta por el sistema de corte en bloques (Wilson, 1985; Ansorena, 1994).

Teóricamente, entre más pequeñas sean las partículas habrá mayor superficie específica, y por lo tanto mayor retención de humedad. No obstante, Segura (2001) mencionó que el contenido de agua tiene un comportamiento normal en diferentes diámetros de la pomez; es decir, el diámetro que retiene más contenido de humedad, después de 24 horas de saturación, es el de 2.38 a 3.35 mm con 68.4%. Es probable, que este comportamiento ocurra al existir una relación entre el tamaño de partículas y el número de poros.

Un sustrato se puede elaborar a partir de sus componentes granulométricos y la distribución de los tamaños de las partículas, factores que serán decisivos en las propiedades finales del medio. No basta con indicar que un sustrato contiene uno u otro material, sino que se debe especificar la distribución granulométrica. La base teórica de la distribución de los tamaños de las partículas es que éstas determinan el tamaño de los poros de un sustrato, y por lo tanto su capacidad de retención de agua, lo que llevó a Pokorny (1987) a predecir que si se introducía la información sobre las propiedades de los sustratos en una computadora se podría llegar a controlar el sistema de cultivo bajo un programa integrado, siendo importante la búsqueda de metodologías que permitan aportar conocimientos sobre sustratos.

En el caso de los sustratos, no existe un sistema universal de clasificación granulométrica de las diferentes fracciones que resultan del tamizado, ya que cada país lo adapta a la serie de tamices correspondientes a sus normas oficiales. Actualmente, las propiedades físicas de un sustrato no se pueden predecir de forma sencilla a partir de sus componentes, ya que estos varían considerablemente de una zona a otra; además, al mezclarlos se producen interacciones, que hacen que las propiedades físicas de la mezcla final no sean la media de sus componentes, por ello es necesario determinar en cada caso las propiedades de los componentes o las mezclas.

2.4.2 Propiedades químicas

Son importantes, ya que de ellas dependerán en gran parte la disponibilidad de nutrientes. La reactividad química de un sustrato se define como la transferencia de materia entre el sustrato y la solución nutritiva que alimenta las plantas a través de las raíces. Esta transferencia es recíproca entre sustrato y solución de nutrientes, y puede deberse a reacciones de distinta naturaleza. Las reacciones químicas se deben a la disolución de los sustratos orgánicos y pueden provocar efectos fitotóxicos por la liberación de iones H^+ y OH^- y ciertos iones metálicos como el Co^{2+} .

2.4.2.1 Capacidad de intercambio catiónico

Es la suma de los cationes intercambiables, medidos en unidades llamadas miliequivalentes (meq), que un material puede adsorber por unidad de peso o volumen. Esta propiedad la proporcionan algunas partículas inorgánicas y orgánicas cargadas negativamente en su superficie. Las cargas negativas generan una fuerza de atracción hacia los elementos cargados positivamente, sin reaccionar químicamente (fenómeno de adsorción) (Bunt, 1988).

La CIC ha sido medida tradicionalmente con base en el peso en suelos naturales; sin embargo, en sustratos es más significativa la medida por volumen a causa de la baja densidad de muchos de estos, ya que el volumen es actualmente la base aceptada para la medición de la CIC con propósitos hortícolas (Bunt, 1988). La vermiculita, compostas, vermicompostas y la turba de musgo tienen los mayores valores de CIC, mientras que los materiales inorgánicos como la perlita y la arena, tienen valores de CIC muy bajos. Bunt (1988) indicó que la mezcla

de turba-vermiculita tiene la mayor CIC y concluyó que los valores elevados de CIC son deseables para los medios de crecimiento, puesto que mantienen una reserva de fertilidad que abastece al crecimiento de la planta entre las aplicaciones de fertilizantes.

El sustrato debe tener una capacidad de intercambio catiónico entre 50 a 100 $\text{Cmol}^+ \text{L}^{-1}$, ya que el suministro de cationes será constante y la pérdida de nutrientes es menor (Handreck y Black, 1994). Nelson (1978) señaló valores entre 10 y 30 $\text{Cmol}^+/\text{100g}$ y mencionó que en valores menores, el sustrato no actuaría como reservorio de nutrientes y será necesario aplicar fertilizante. La CIC también puede permitir retener cationes en el sustrato, previniendo la lixiviación, ante intensas tasas de riego.

2.4.2.2 Conductividad eléctrica y pH

La conductividad eléctrica (dS/m) es la concentración de sales que afecta al potencial osmótico, el cual está relacionado con la concentración de iones en la fase líquida, y puede alterar la absorción del agua por la planta (Ansorena, 1994).

Otra propiedad importante en los sustratos es el pH, el cual se define como la medida de la acidez o alcalinidad relativa de una sustancia, con base en una escala de 0 a 14. Los materiales utilizados para formular mezclas de sustratos difieren considerablemente en pH, por ejemplo, las turbas de musgo son comúnmente de naturaleza ácida, dependiendo de la planta constituyente y de la calidad local del agua (Bunt, 1988). El pH final de un sustrato dependerá de la proporción de los materiales que lo integren, así como de las prácticas de cultivo posteriores, especialmente fertilización y riego. El pH del agua de riego está generalmente cercana a la neutralidad, o es ligeramente alcalina, así que un sustrato normalmente ácido puede incrementarse de 0.5 a 1.0 unidad de pH, durante la etapa de crecimiento (Gladon, 1988). El principal efecto del pH en los suelos minerales, radica en la influencia en la disponibilidad de nutrientes minerales, especialmente micronutrientes; varios nutrientes minerales pueden hacerse no disponibles o incluso tóxicos con valores extremos de pH. Por lo tanto, se deben tratar de mantener el pH de los sustratos dentro de un intervalo ligeramente ácido, entre 5.5 y 6.5 (Ansorena, 1994).

2.4.2.3 Aporte nutrimental

Según sea el pH del sustrato, serán aprovechables en mayor o menor medida los iones de unos u otros minerales; por ejemplo, en un pH bajo estarán poco disponibles los iones de calcio, azufre y potasio, mientras que a pH alto, son poco asimilables los iones de fósforo, hierro, manganeso y zinc (Salisbury y Ross, 1994).

Normalmente, se prefieren sustratos inertes frente a los químicamente activos. Winsor (1990) mencionó que los materiales inertes como perlita, vermiculita y otros, presentaron una estabilidad química o resistencia a la descomposición, aunque algunos pueden tener una importante actividad química (vermiculita, zeolita, etc.). Esto puede parecer incongruente; sin embargo, la baja fertilidad se considera un atributo para los sustratos (Mastalerz, 1977; James, 1987), ya que la actividad química aporta a la solución nutritiva elementos adicionales por procesos de hidrólisis o solubilidad; si son útiles afectan el equilibrio de la solución al aumentar la incorporación de un aporte extra con el que habrá que contar, y si son tóxicos, el sustrato no sirve y hay que descartarlo. Los procesos químicos también perjudican la estructura del sustrato, cambiando sus propiedades (Gabriels *et al.*, 1985).

Los sustratos con materia orgánica se descomponen y experimentan una serie de cambios, hasta que alcanzan una estabilidad biológica. Estos cambios se toman en cuenta en las mezclas de sustratos como: turba, cortezas de árboles, compostas, vermicompostas, etc. En el caso de las turbas, al tratarse de materiales que han estado sometidos durante largo tiempo a los procesos naturales de degradación biológica, su estabilidad es elevada y no existe riesgo de descomposición.

Otros materiales como cortezas de árboles, y la mayoría de subproductos y residuos orgánicos, deberán tener una descomposición microbiana antes de su empleo como sustratos, proceso que se conoce como compostaje. Si este no es adecuado, se producirán fenómenos fitotóxicos (liberación de compuestos fenólicos y sustancias tóxicas) y de inmovilización de nitrógeno (Ansorena, 1994).

2.4.3 Propiedades biológicas

Aunque generalmente poco se habla de las características biológicas de los sustratos, éstas se deben considerar, ya que están relacionadas principalmente con la sanidad y descomposición de los materiales. La sanidad puede conseguirse mediante la pasteurización (calor húmedo) o aplicaciones de insumos químicos. En cuanto a la descomposición del sustrato, es preferible utilizar materiales previamente composteados, de lo contrario se pueden tener problemas como: incremento en la compactación, reducción de volumen y de la porosidad, disminución del contenido de aire, y aumento del contenido de agua, alteraciones en el tamaño de partículas, modificaciones en la composición de gases debido a un incremento de CO₂, aumento de pH y de CIC, incremento de la conductividad eléctrica (concentración de sales) por mineralización y síntesis de compuestos orgánicos que pueden ser tóxicos o promover efectos estimulantes.

Uno de los aspectos importantes a considerar en los sustratos de origen orgánico es conocer la relación C/N. Esta característica permite predecir una rápida descomposición del material, ya que el sustrato orgánico de origen vegetal está compuesto de lignina (un compuesto químico de lenta descomposición) y de polisacáridos como almidón, hemicelulosa y celulosa que no se descomponen fácilmente. Reiterando, que si el sustrato a emplear tiene un alto contenido de compuestos de rápida biodegradación tenderá a competir con la planta por el fenómeno de inmovilización de nitrógeno, perjudicando su desarrollo. Por todo lo anterior, una combinación de materiales para formular el sustrato debe tener características de estabilidad en la degradación.

2.4.4 Propiedades micromorfológicas

La micromorfología se refiere a la descripción, interpretación y principalmente la medición de los componentes y rasgos a nivel microscópico. Los datos micromorfológicos proporcionan una base sólida para la clasificación de poros. En la descripción de secciones delgadas se determina mediante algunos de los criterios fundamentales de los constituyentes (Bullock *et al.*, 1985).

2.4.4.1 Tamaño

La identificación y la medición de los constituyentes en las secciones delgadas dependen del poder de resolución del microscopio empleado (1 μ m). Los estudios se deben apoyar, con los datos de tamaño de partículas, que se obtienen por métodos de tamizado y sedimentación. Las secciones delgadas proporcionan una de las pocas formas para obtener la distribución del tamaño de partículas (Friedman, 1958).

2.4.4.2 Poros

Se presentan diferentes posiciones: entre las partículas (inter), dentro de las partículas (intra) y a través de las partículas (trans). La abundancia de poros estima el espacio poroso total, la proporción y distribución de los diferentes tipos de poros.

Existen varias clasificaciones de tipos de poros. El más usado es el de Brewer (1964) quien indicó diferentes grupos de poros: poros de empaquetamiento, vesículas, canales, cámaras y fisuras, las principales características se mencionan en el Cuadro 1.

2.4.4.3 Formas

La forma se describe en dos dimensiones, comúnmente se define con otros parámetros como: redondez (agudeza relativa de las aristas de la partícula.) y esfericidad (forma total de la partícula).

Una propiedad importante de las partículas y poros es la rugosidad que se origina a partir de numerosos procesos, por ejemplo, el intemperismo, transportación de partículas, precipitación, etc. La superficie rugosa se relaciona con el número y grado de angulosidad de las protuberancias que irrumpen la superficie, la superficie lisa no presenta protuberancias angulares y se usan tres categorías: rugosa, ondulada y lisa (Bullock *et al.*, 1985).

Cuadro 1. Características micromorfológicas de las diferentes clases de poros.

Clase de poros	Morfología
Poros de empaquetamiento simple	<ul style="list-style-type: none"> ✎ Son equidimensionales a alargados, muchos están interconectados (continuos). ✎ Ocurren entre granos simples. ✎ Tienen alta permeabilidad. ✎ No retienen la humedad ni los nutrimentos.
Poros de empaquetamiento compuesto	<ul style="list-style-type: none"> • Son equidimensionales a alargados, la mayoría están interconectados. • Ocurren entre agregados esferoidales (granular o migajoso). • Son de origen biológico • Son permanentes y tienen una gran cantidad de microporos. • Retienen agua y nutrimentos.
Poros de empaquetamiento complejo	<ul style="list-style-type: none"> ✎ Los poros están entre agregados simples (partículas grandes) y pequeños. ✎ Son permanentes y continuos. ✎ Tienen alta permeabilidad. ✎ Combinados con minerales y materia orgánica.
Vesículas	<ul style="list-style-type: none"> ✎ Son esferoidales. ✎ Se forman por el atrapamiento de CO₂ ó O₂. ✎ Son discontinuos (no conectados) y permanentes. ✎ No hay movimiento de agua. ✎ Fáciles de cuantificar por su estructura esferoidal. ✎ No sirven para almacenar agua, pero tienen la capacidad de drenar.
Fisuras	<ul style="list-style-type: none"> ✎ A nivel macro son grietas y en micro son fisuras. ✎ No son permanentes. ✎ Son continuas.

2.5 Selección de sustratos

Las plantas cultivadas en macetas tienen un volumen limitado para el crecimiento de raíces, por lo que las necesidades de nutrientes, aire y agua son mayores. Por lo tanto, se deben buscar sustratos que sean capaces de mantener una gran cantidad de raíces en un reducido espacio teniendo suficiente agua y aire disponible (Reinikainen, 1993).

Establecer los criterios para la selección de los componentes de sustratos dependerá de la normatividad de los países. Las características principales, son la uniformidad en la granulometría y estabilidad en la composición química y física (Baker, 1957). Baker (1957); Mastalerz (1977); Raviv *et al.* (1986); Verdonck y Gabriels (1988); propusieron las siguientes características para la selección de sustratos:

a) Propiedades físicas:

- * Elevada capacidad de retención de agua fácilmente disponible.
- * Aireación adecuada.
- * Buen drenaje.
- * Distribución del tamaño de las partículas, que mantenga las condiciones anteriores.
- * Baja densidad aparente (bajo peso).
- * Elevada porosidad.
- * Estructura estable, que impida la contracción del medio.

b) Propiedades químicas:

- * Alta capacidad de intercambio catiónico.
- * Suficiente nivel de nutrientes asimilables (resistencia al lavado de nutrientes).
- * Baja salinidad.
- * Elevada capacidad de amortiguamiento para mantener constante el pH.
- * Mínima velocidad de descomposición.
- * Liberación nula de productos fitotóxicos.

c) Otras propiedades:

- * Libre de semillas de malas hierbas, nematodos y otros patógenos.
- * Reproductividad y disponibilidad.
- * Bajo costo.
- * Fácil de mezclar y desinfectar.
- * Estabilidad frente a la desinfección con vapor o productos fumigantes.
- * Resistencia a cambios externos físicos, químicos y ambientales.
- * Facilidad de la mezcla.
- * Posibilidad de ser reciclados.

El sustrato ideal debe ser estable, es decir, no perder fácilmente sus cualidades físicas. Bunt (1988) indicó que es importante conocer los principios físicos básicos en la formulación de sustratos, más que las descripciones de fórmulas específicas.

2.6 Descripción de los materiales para las mezclas de sustratos

Existe un elevado número de materiales aptos para la formulación de mezclas de sustratos. En general, los más conocidos son: turbas (peat moss), residuos forestales (hojas y cortezas), arenas y materiales sintéticos (perlita, vermiculita, lana de roca, poliestireno, etc.) para cultivos en macetas. Para cultivos en suelo también se elaboran sustratos con estiércoles, mantillos, tierra vegetal, etc. Los materiales orgánicos son componentes deseables de los sustratos, ya que generan gran proporción de microporos, produciendo una elevada capacidad de retención de humedad, además que son suficientemente resilientes para resistir a la compactación (Mastalerz, 1977).

A continuación se describen brevemente algunos materiales que se utilizan para las mezclas de sustratos.

2.6.1 Fibra de coco o polvo de coco

Es un material originado durante el proceso para la extracción de fibra de coco obtenida a partir del mesocarpio del coco; tiene excelentes propiedades físicas y no presenta problemas de repelencia al agua; debido a la presencia de poros finos que generan una favorable retención de la misma. El principal problema que tiene es el alto contenido en cloro, que varía de acuerdo al lugar de procedencia, también puede presentar un elevado contenido de potasio y bajas cantidades de calcio; su degradación es lenta, por lo que se utiliza en cultivos de ciclo largo (Handreck y Black, 1994; Meggelen-Laagland, 1995).

La fibra de coco es un material que a nivel mundial ha llamado la atención, ya que algunos autores la consideran como un sustituto posible del peat moss. Dentro de los principales países productores de fibra de coco se encuentran: Sri Lanka, India, Filipinas, Indonesia, México, Costa Rica y Guyana (Konduru *et al.*, 1999). México a pesar de ser uno de los principales productores de fibra de coco, no cuenta con trabajos publicados sobre

caracterización, presentando una tendencia a desarrollar trabajos a nivel agronómico, por lo que es necesario, tener una caracterización completa de los materiales utilizados como sustratos.

2.6.2 Turba o Peat Moss

La turba se forma por la descomposición parcial de musgos y juncos bajo condiciones ácidas de inundación y ausencia de nutrientes; los microorganismos que fragmentan o descomponen las plantas son excluidos, y por ello sólo ocurre la descomposición parcial de los tejidos muertos (Mastalerz, 1977).

Durante las últimas décadas, la turba o peat moss ha sido muy utilizado como sustrato en Europa, debido a la disponibilidad en estos países (norte y centro), gracias a las grandes reservas de turba de calidades favorables (características físicas y químicas), por ello el uso se ha incrementado para los cultivos en maceta y en la horticultura sin suelo, además de las cualidades que le proporciona (Lemaire, 1993). Actualmente, por cuestiones ambientales se está limitando la extracción en las turberas, por ser reservas no renovables, y porque el transporte resulta ser muy costoso para los países que no disponen de este material. Una alternativa, es sustituir el uso del peat moss por otro material de origen orgánico que podría ser la fibra de coco.

Las diferencias entre los distintos tipos de turbas se relacionan con el clima local, las especies de plantas de las cuales se forman y el grado de descomposición en el pantano (Carlson, 1983; Bunt, 1988); por ejemplo, las turbas rubias o poco descompuestas son de mejor calidad debido a su estructura, porque poseen una excelente porosidad y es buena receptora de soluciones nutritivas, proporcionando gran aireación a las raíces; además, esta libre de gérmenes, semillas, malas hierbas y es muy ligera. Las turbas negras, están más descompuestas y no tienen buena calidad, ya que no retienen el agua y poseen menos aireación para las raíces.

2.6.3 Composta

Los desperdicios orgánicos representan el mayor problema, debido a que durante el proceso de descomposición producen olores indeseables y plagas de insectos y roedores; además, sus lixiviados contaminan las aguas subterráneas y al ambiente. Una forma de manejar y a la vez aprovechar los desperdicios de este tipo, es mediante la descomposición aeróbica de la materia orgánica, proceso conocido como compostaje y el producto que se obtiene es denominado composta que pueden utilizarse como sustratos (Hoitink y Kuter, 1986; Zucconi y Bertoldi, 1987).

El termino composta, se refiere al producto derivado de la evolución del proceso de compostaje, es decir la estabilización y saneamiento de los residuos orgánicos, que han pasado por una etapa inicial y una de descomposición rápida (mesófila, termofila, enfriamiento y maduración); esta ultima involucra el proceso de humificación, haciéndola benéfica para las plantas cultivadas (Bertoldi *et al.*, 1985). El compostaje consiste de un proceso biooxidativo de residuos orgánicos bajo condiciones estrictamente controladas de temperatura, humedad y aireación, en el cual participan diferentes grupos microbianos dependiendo de la etapa y del proceso (Hoitink y Kuter, 1986; Zucconi y Bertoldi, 1987); de descomposición de residuos sólidos orgánicos en materiales relativamente estables semejantes al humus (Xian-Tao *et al.*, 1992).

Las compostas son biológicamente estables y pueden incrementar el contenido de materia orgánica, nutrientes, capacidad de intercambio catiónico, capacidad de almacenamiento de agua y permeabilidad (Brady y Weil, 1999). Las características y composición de la composta varían de acuerdo con el tipo de material utilizado, región geográfica, estación del año y diferencias en el pre tratamiento y control del proceso; por lo tanto, es difícil hacer una descripción generalizada de la composición de la composta (Zucconi y Bertoldi, 1987; Xin Tao *et al.*, 1992).

2.6.4 Vermicomposta

Habitualmente la descomposición de los residuos orgánicos es un proceso de baja velocidad; sin embargo, otros mecanismos de humificación, como el composteo, pueden

acelerar dicha velocidad. El composteo con frecuencia es utilizado cuando hay una conversión de la materia orgánica fresca a sustratos, con un alto grado de descomposición y es realizada en un período de tiempo relativamente corto (pocos meses). Durante el proceso de composteo, los residuos orgánicos se descomponen bajo la acción de diversos microorganismos y factores ambientales (Atiyeh *et al.*, 2000a; Soto y Muñoz, 2002; Pereira y Zezzi-Arruda, 2003).

El método convencional y más tradicional de composteo consiste en la biooxidación acelerada de la materia orgánica conforme pasa a través de una etapa termofílica (45 a 65°C). Sin embargo, para facilitar la descomposición y estabilización de los residuos orgánicos, diversos investigadores han optado por utilizar otro proceso biológico, el cual no incluye la etapa termofílica, sino que incluye el empleo de lombrices de tierra, recibiendo el nombre de vermicomposteo (Atiyeh *et al.*, 2000a). Las lombrices de tierra son consumidores de residuos orgánicos y aún cuando sólo utilizan sólo una pequeña porción para la síntesis de sus cuerpos, ellas excretan una gran parte de los residuos consumidos en una forma medio digerida. Puesto que los intestinos de las lombrices contienen una amplia gama de microorganismos, enzimas, hormonas, etc., éstos materiales medio digeridos se descomponen rápidamente y son transformados a una forma de vermicomposta en un período de tiempo corto (Ghosh *et al.*, 1999).

La vermicomposta es un material de color oscuro, con un olor agradable a mantillo de bosque, su gran bioestabilidad evita su fermentación o putrefacción, contiene una elevada carga enzimática y bacteriana que incrementa la solubilidad de los elementos nutritivos, liberándolos en forma paulatina, facilita la asimilación de nutrientes a nivel radical e impide que éstos sean lixiviados con el agua de riego (manteniéndolos disponibles por más tiempo), posee bajas cantidades de sales solubles, un creciente contenido de ácidos húmicos totales, favorece la germinación de las semillas y el desarrollo de las plantas, impide la proliferación de organismos patógenos, incrementa la CIC y mejora las características estructurales del suelo (Edwards y Steele 1997; Buck *et al.*, 2000; Atiyeh *et al.*, 2000b; Canellas *et al.*, 2002; Pereira y Zezzi-Arruda, 2003).

Este material se caracteriza por proporcionar porosidad, aireación drenaje y capacidad de retención de humedad. Además, presenta una gran área superficial, permitiéndole adsorber y retener fuertemente los elementos nutritivos, los cuales se encuentran en formas que son fácilmente asimilables para las plantas tales como los nitratos, el fósforo intercambiable, potasio, calcio y magnesio solubles. En consecuencia, las vermicompostas pueden tener un gran potencial en las industrias hortícolas y agrícolas como sustratos para el crecimiento de las plantas (Atiyeh *et al.*, 2000a; Atiyeh *et al.*; 2000b). Debido a lo anterior, hoy en día se reconoce por diversos autores que el empleo de la vermicomposta en las actividades hortícolas produce en las plantas mejoras significativas en su aspecto, sanidad y rendimiento (Castillo *et al.*, 2000).

2.6.5 Tezontle

Es una roca volcánica extrusiva, muy porosa y ligera de color negro o rojizo que se encuentra en forma abundante y con diversos tamaños en regiones de actividad volcánica (Mastalerz, 1977).

2.6.6 Perlita o Agrolita

Es un material silíceo poroso, producido por el calentamiento rápido de un vidrio volcánico natural a 1200°C, proceso en el que se expande y da unas partículas blancas de poco peso; tiene una estructura interna ocluida y por eso el agua sólo es retenida sobre la superficie o en los espacios entre sus partículas; es útil para proporcionar porosidad y posee una capacidad de retención de agua de hasta 5 veces su peso; las granulometrías más gruesas se usan para aumentar la aireación de los materiales más finos; es estéril, tiene un pH de 7 a 7.5 y no aporta nutrimentos (Bunt, 1988; Handreck y Black, 1994).

2.6.7 Piedra pómez

La piedra pómez es muy ligera, de color blanco, que se forma cuando la espuma de lava emerge del volcán (roca ígnea extrusiva) y se enfría tan rápido que los cristales no alcanzan a formarse (Mastalerz, 1977). Está constituida por muchos poros formados por el escape de vapor o gas cuando la lava se enfría; la porosidad interna de la piedra pómez puede ser la responsable de su baja densidad más que el tamaño de las partículas (Drees *et al.*, 1989).

Se usa como acondicionador físico en las mezclas para cultivos en maceta; sus partículas no son muy estables y se rompen con facilidad. Pueden absorber algo de calcio, potasio, magnesio y fósforo de la solución del suelo y liberarlo posteriormente a las plantas (Bunt, 1988).

La piedra pómez es un alumino-silicato compuesto por tetraedros de sílice (SiO_2) que no tienen un arreglo sistemático, además de otros elementos como Fe, Mg, Ca, Al, K (1.4 a 9.7 g kg^{-1}) y Na, (Drees *et al.*, 1989). Este arreglo desordenado facilita que el material se intemperice fácilmente (Allen y Hajek, 1989), por procesos de hidrólisis (formación de arcillas) o por oxido-reducción (formación de ferrihidrita) que afecta directamente a la superficie del material (formando una alteración pelicular); por lo que los materiales secundarios amorfos que se forman en la superficie de la piedra pómez exhiben cargas.

2.6.8 Zeolita

Las zeolitas son minerales cristalinos de aluminosilicatos hidratados que contienen cationes alcalinos y alcalinotérreos (Southard y Kolesar, 1978). Este mineral tiene estructuras cristalinas que se caracterizan por su capacidad de hidratarse y deshidratarse reversiblemente. Sin embargo, las condiciones que requieren para su formación son específicas; es decir, necesita de ambientes salinos y fuertemente alcalinos. La alteración diagenética post depositacional del vidrio volcánico y la subsecuente cristalización de las zeolitas de la solución percolada es común en sedimentos tobáceos bajo condiciones de fuerte alcalinidad (Southard y Kolesar, 1978); aunque también, se han reportado zeolitas en suelos ácidos de Nueva Zelanda (Kirkman, 1976). Cabe señalar, que este material presenta superficies específicas altas (interna) caracterizadas por un volumen poroso de 20 a 50% (Rees, 1980; Minge y Mumpton, 1989).

2.7 Métodos para la selección de sustratos

Durante los últimos años se han desarrollado diversas técnicas en diversos ámbitos de la industria para obtener mezclas con las propiedades adecuadas por ejemplo: métodos de ensayo y error, Monte Carlo y programación lineal.

2.7.1 Método de ensayo y error

Este procedimiento empírico implica un número de mezclas extremadamente grande, similar a los análisis requeridos para su evaluación, antes de seleccionar la mezcla adecuada, algunos pueden tener éxito y otros no.

Reis (1995) usó la corteza de pino como medio de cultivo, en proporciones de 25 a 100% como componente de mezclas para producción de plantas ornamentales en maceta; encontró que una de sus principales características es que no reduce su volumen con el paso del tiempo, aunque se debe considerar su baja capacidad para retener humedad. Chong *et al.* (1994) realizaron varios ensayos para mejorar la retención de humedad mezclando la corteza de pino con otros materiales tales como turba, sustrato agotado del cultivo de champiñón y arena; las mezclas se evaluaron en arbustos ornamentales. Los resultados mostraron que la presencia o ausencia de arena no tuvo influencia sobre el crecimiento de las plantas, pero señalaron que los sustratos mejorados con la composta de champiñón presentaron menores valores de compactación.

Prasad (1997) reportó que el polvo de coco en muchos de los ensayos realizados mostró propiedades físicas, químicas y biológicas adecuadas para ser usado como medio de cultivo. Awang y Razi (1997) señalaron que su uso no ocasiona problemas de anclaje en cultivos ornamentales anuales a pesar de tener baja densidad aparente; además, si se mezcla con arena (1:1 v/v) se mejora la humectabilidad en más de 33% y aumenta la porosidad en 23.7%. Estos autores también observaron que agregando varios niveles de fibra es posible incrementar la porosidad hasta en 35%, manteniéndose en un nivel satisfactorio el agua fácilmente disponible. Sin embargo, al comparar los valores de la capacidad amortiguadora de agua en el polvo de coco estuvieron por debajo de la turba, demostrando así que existe un incremento súbito en la transpiración, por lo que las plantas tienden a marchitarse rápidamente, siendo necesario ajustar el régimen de riego. Meerow (1994) realizó un ensayo en el cual evaluó el crecimiento de dos especies de plantas ornamentales subtropicales comparando polvo de coco y turba, observaron que el polvo de coco parece ser un sustituto aceptable para la turba en sustratos para maceta, aunque es necesario ajustar los regímenes

nutricionales de un cultivo a otro. Es importante mencionar que la pérdida de volumen del polvo de coco que se tiene en un sustrato se debe a su baja densidad, rápida degradación de los componentes orgánicos o por lavado de partículas hacia fuera de la maceta (Argo y Biernbaum, 1996).

Nappi (1993) realizó varios ensayos donde se comparó turba y diversas compostas, y los mejores resultados se obtuvieron al usar compostas, ya que las plantas mostraron un crecimiento vigoroso y el desarrollo vegetativo fue superior, especialmente a dosis entre 25 y 50% v/v, y la densidad aparente de las compostas se encontró en un rango ideal para sustratos de 0.15 a 0.19 g cm⁻³ y concluyó que las características que debe reunir una composta para emplearse como sustrato son: alto contenido de humus, bajo contenido de contaminantes y buena estabilidad biológica.

En México, la investigación sobre sustratos está orientada a la realización de trabajos sobre la evaluación en la producción de plántulas de hortalizas, plantas forestales y plantas ornamentales en maceta. La mayoría son trabajos de tesis (Jaimes, 1994; Velásquez, 1995; Zarate, 1995) y se puede observar el uso de diversas metodologías utilizadas. Cabe destacar que no toman en cuenta la caracterización de los sustratos antes de realizar las mezclas, y sólo se enfocan en la evaluación de la respuesta de las plantas cultivadas como indicadores.

2.7.2 Método Monte Carlo

Es un método de simulación de gran alcance para estudiar sistemas físicos. Con este método los números al azar se utilizan para simular los procesos que ocurren con frecuencia en la naturaleza (Gould y Tobochnik, 1988); además, se utiliza en diversas áreas de la investigación como: Física, Matemáticas, Economía, Medicina, Bioquímica, Comunicación, entre otros campos. La simulación a través de una computadora permite comprobar la calidad de los modelos para los procesos; su flexibilidad tiene el control exacto de las variables que facilitan el estudio de diversos componentes paralelos al sistema, y los fenómenos correlacionados, o los procesos a largo plazo de la variación (Binder, 1986). Se considera que existen múltiples ventajas cuando se usa la simulación, entre las que destacan: reducción de tiempo, trabajo y dinero, comparados con los sistemas experimentales tradicionales de

selección; asimismo tiene la característica de eliminar los riesgos y los errores experimentales que se pueden encontrar al conducir un experimento.

La aplicación de este método de simulación en la horticultura, se fundamenta en el principio de que muchos de los fenómenos durante el proceso productivo ocurren al azar y se basa en la determinación de la influencia del tamaño de contenedor en relación con el sistema productivo, en particular a las propiedades físicas del sustrato. Burés *et al.* (1993) indicaron que al establecer el tamaño del contenedor mediante el empleo de simulación del método Monte Carlo, se puede utilizar como modelo para los sistemas físicos. Finney (1983); Barker y Gormson (1990) establecieron que las coordenadas de las partículas representan un verdadero ensamblaje, ya que las partículas constituyen un sistema estructurado, del cual varias características pueden ser calculadas. La medida del envase en relación con el tamaño de las partículas se puede considerar un sistema al azar. La aplicación de técnicas de simulación en sistemas permite definir el tamaño del envase y simultáneamente caracterizar los modelos de embalaje y además se pueden establecer analogías entre la medida del envase y la geometría de las partículas.

Los materiales que pueden ser útiles en la formulación de sustratos pueden ser considerados mediante la aplicación de este método de simulación (Penninck *et al.*, 1985); así mismo, debido a que los sustratos son sistemas de partículas, es posible aplicar varias técnicas de simulación por computadora para estudiar los materiales granulares y los espacios porosos (Adler, 1992).

La simulación mediante el método Monte Carlo es factible para la caracterización de algunas propiedades físicas de los sustratos, ya que se formula a partir de un algoritmo que calcula el tamaño del poro presente en un envase al simular el tamaño de partícula. En este sentido, algunos autores como Burés *et al.* (1995) caracterizaron el tamaño externo del sistema simulando, el tamaño de partículas mediante esferas de arena estudiando las relaciones aire/agua. Es importante mencionar, que este tipo de trabajos son totalmente teóricos y difícilmente las partículas resultan ser de formas homogéneas, especialmente en sustratos

orgánicos, por ejemplo, materiales como el peat moss y la fibra de coco tienen una gran diversidad de formas, dificultando su simulación.

2.7.3 Método de Programación lineal

Sin duda la selección de un sustrato resulta ser un tema complejo, que requiere de un mayor desarrollo tecnológico más allá de la modelación con el tamaño de partículas y la porosidad, lo cual dificulta la elección del mismo (Beneke y Winterboer, 1973; Romero, 1979). Actualmente, no existen suficientes referencias del uso de programación lineal en la formulación de sustratos. Pokorny (1981) indicó esta posibilidad, no obstante mencionó que hay dificultad al integrar las variables para la selección de sustratos y determinar qué características deben tener los materiales, ya que rara vez tienen relaciones lineales estrictas por la falta de los parámetros que correspondan a la estructura de los materiales; además, dicho autor mencionó que las propiedades físicas están influidas por el tamaño y la forma, las propiedades hidrofílicas y la estructura interna de las partículas. Spomer (1974) informó que cuando los materiales con diferentes tamaños de partículas se mezclan, el volumen, es generalmente menor que los volúmenes de los materiales individuales, y cuando más grande es la diferencia entre el tamaño de la partícula de los componentes más pronunciados serán las disminuciones en el volumen de la mezcla. Bodman y Constantin (1965) reportaron este hecho para mezclas de tierra.

Otra situación es cuando dos materiales diferentes, con una distribución semejante de tamaño de partícula se mezclan, no suceden cambios o éstos son mínimos. Bunt (1983) trabajó con diferentes sustratos, no encontró ninguna interacción entre el tamaño de la partícula y la suma del espacio poroso, a diferencia de lo reportado por Spomer (1974) quien trabajó principalmente con combinaciones de arena. Pokorny *et al.* (1986) pudieron predecir que el volumen y la densidad de la corteza de pino mezclada con arena están en función a la distribución y tamaño de partículas a partir de la combinación de estos materiales como componentes, mediante una ecuación, encontrando linealidad en el pH y la capacidad de intercambio catiónico (CIC).

Con respecto a lo anterior, Burés *et al.* (1988) realizaron trabajos en donde emplearon técnicas de programación lineal a partir de materiales únicos; obtuvieron combinaciones de sustrato al caracterizar las propiedades físicas y químicas, a partir de nueve materiales originales, considerando las características de la combinación deseada. Las mezclas de sustratos elegidos se elaboraron empleando las proporciones de los materiales individuales. Estos estudios realizados sobre las propiedades físicas de mezclas de sustratos según las propiedades de los materiales originales han indicado que la selección se puede seguir a partir de un modelo lineal para obtener la mezcla deseada según las características de los componentes. Zamora *et al.* (2005) trabajaron formulando mezclas de sustratos mediante la técnica de programación lineal en diferentes materiales según las características de sus componentes e indicaron, que es favorable para mezclas de sustratos específicos, reduciendo el número de mezclas para su análisis. Sin embargo, la metodología que utilizaron no se reporta completamente, por lo que es necesario generar una metodología que habilite e integre las variables físicas, químicas y micromorfológicas que caractericen las materias primas de un sustrato y sus combinaciones en función a la caracterización de los componentes. Finalmente, los trabajos existentes son modelaciones y no se han llevado a la práctica.

2.8 *Lisianthus (Eustoma grandiflorum)* como especie cultivada en sustratos

El *Lisianthus*, anteriormente conocido como *Lisianthus russellianus* y ahora *Eustoma grandiflorum* (Pergola, 1992), es una planta originaria de las praderas húmedas de la zona meridional y montañosa de los Estados Unidos, específicamente en Nebraska, Colorado y Texas, y del Norte de México; su hábitat natural es a lo largo de las riveras de los ríos. Perteneció a la familia de las Gencianeáceas que abarca alrededor de 70 géneros y más de 800 especies. Es una planta de ciclo anual o bianual (Farina, 1989), forma una roseta de hojas sobre la que se desarrolla un tallo de 40 a 50 cm de largo, en cuyo extremo nacen las flores largamente pedunculadas y que miden de 6 a 9 cm de diámetro.

Es una planta de reciente introducción en México y aún no es bien conocida, a pesar de que se cultiva en gran escala en Holanda, Israel, Estados Unidos, Italia, Francia y Japón. En estos países se han realizado ambiciosos programas de mejoramiento genético, que han

permitido el desarrollo de nuevos cultivares en una amplia gama de colores que pueden variar de azul-púrpura a blanco y rosado (Halevy y Kofranek 1984).

Actualmente, se ha mostrado un incremento en la producción de cultivo de *Lisianthus* en maceta. De acuerdo con cifras presentadas por Ohkawa y Sasaki (1999) la producción de *Lisianthus* en macetas se ha incrementado en 30% alcanzando una producción de 600, 000 macetas; en comparación a *Lisianthus* para flor de corte con una producción anual de 115 millones de tallos. Es posible, observar el incremento en la preferencia por parte de los consumidores en adquirir este producto, ya que es una especie novedosa, vistosa, con larga vida postcosecha y un precio elevado. El costo en el mercado de Estados Unidos oscila entre \$ 85.00 y \$131.00 pesos el ramillete de 10 tallos largos y en México entre \$80 y \$120 pesos (SNIIM, 2007).

Además, es una de las especies ornamentales de importancia económica y con un futuro prometedor en nuestro país, debido a la rentabilidad y adaptación a las condiciones climáticas; el sistema de producción implica el empleo de sustratos constituidos por diversos materiales, cuya principal función es cubrir sus requerimientos, tanto antes de su comercialización como posterior a la misma.

La selección de sustratos que se ha utilizado en esta planta se realiza siguiendo una metodología de ensayo y error, teniendo una influencia directa sobre la calidad en la producción. Melgares de Aguilar (1997) realizó dos ensayos de la especie de *Lisianthus* en maceta y recomendó como sustrato una mezcla de TKS2 (67%) y perlita (33%), por ser la que mejores resultados presentó, con una fertilización de lenta liberación de 15-10-12 (N-P-K).

Un sustrato que no posee un nivel nutricional adecuado, puede mejorarse añadiendo una buena fertilización, o lavar para eliminar el exceso de sales, pero si la estructura física es inadecuada, difícilmente se puede mejorar. El reducido volumen de un sustrato con respecto al de un suelo en campo, implica que las propiedades físicas de aireación y retención de agua en el sustrato son más exigentes (mínima de 85%), siendo que no es suficiente que éste posea una

elevada porosidad total, sino que es necesario que se encuentre favorablemente distribuida entre los macroporos, que pueden estar ocupados por el aire, y los microporos que alojan el agua. La adecuada distribución de tamaños de partícula es importante, ya que si estas son grandes, también lo será el tamaño de los poros, y puede suceder que el sustrato esté bien aireado pero retenga poca agua.

De acuerdo con lo anterior, surge la necesidad de realizar estudios que faciliten la obtención de sustratos específicos con la finalidad de que éste no constituya una limitante en el crecimiento de esta especie. Cabe destacar, que el manejo del riego y la fertilización, son factores importantes, que también se estudiarán.

2.9 Conclusiones de la revisión de literatura

La importancia del cultivo en sustratos se presenta en la producción de plantas ornamentales en contenedores o macetas. Actualmente, existe un incremento en la demanda de éstos en el área de jardinería y la producción de hortalizas.

Un componente común en la producción de ornamentales es la maceta, la cual tiene volumen limitado y obliga a intensificar el riego y la fertilización. Además, es restrictivo, ya que la base del contenedor actúa como una barrera donde el agua se encuentra retenida a bajas tensiones por la matriz del sustrato. El hecho de que los contenedores tengan un volumen limitado, hace necesario que se deba proporcionar la máxima cantidad de agua posible por volumen de maceta, por lo que los sustratos deben tener como principales características: el contenido de agua a bajas tensiones y la capacidad de aireación, ya que se sabe que la eficiencia de las plantas cultivadas se incrementa.

En México, al igual que en muchos países, los sustratos se obtienen tradicionalmente por el método de "ensayo y error", es decir, se parte de una serie de materiales conocidos, se mezclan en distintas proporciones, y se analizan los sustratos resultantes. La cantidad de materiales y las muestras a analizar son numerosas y si a esto se añade optimizar el costo de los materiales, o maximizar la dosis de un determinado sustrato, resulta complicado y costoso elaborar mezclas, aunado a ello que no se realiza la caracterización de los materiales. Este es

un problema de difícil solución por el número de variables en juego, por lo que es indispensable avanzar haciendo uso de técnicas y metodologías que simplifiquen la obtención de sustratos, que reduzcan los costos y optimicen resultados.

Es necesario, realizar la caracterización de los materiales para definir hipotéticamente las mezclas de sustratos, seleccionando aquellos que tienen las características más adecuadas y llevarlo a la práctica para la obtención de resultados. Sin embargo, también es importante encontrar un sistema o método que habilite e integre todas las variables que caracterizan las materias primas de un sustrato y sus combinaciones.

III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

3.1 Objetivo general

Generar mezclas de sustratos a partir de materiales orgánicos e inorgánicos con base en las propiedades físicas y micromorfológicas, para la producción de *Lisianthus (Eustoma grandiflorum)*.

3.1.1 Objetivos específicos

1. Caracterizar los sustratos orgánicos (fibra de coco, peat-moss, composta y vermicomposta) e inorgánicos (tezontle, perlita, piedra pómez, y zeolita), con base en sus propiedades físicas y micromorfológicas.
2. Determinar la influencia del tamaño de partícula sobre las características físicas de sustratos orgánicos e inorgánicos.
3. Determinar la eficiencia de la aplicación de agua en diferentes tamaños de partícula de mezclas de sustratos, considerando el consumo y drenaje en la producción de *Lisianthus*.
4. Analizar la factibilidad económica de las mezclas de sustratos seleccionados para la producción de *Lisianthus*.

3.2 Hipótesis general

La generación de mezclas de sustratos a partir de la caracterización de los componentes, es factible para la producción de *Lisianthus (Eustoma grandiflorum)*.

3.2.1 Hipótesis específicas

1. La caracterización física y micromorfológica de los sustratos orgánicos e inorgánicos determina la relación agua/aire, granulometría y tipo de poros.
2. El tamaño de partícula de sustratos orgánicos e inorgánicos tiene influencia sobre las características físicas y micromorfológicas debido al empaquetamiento de éstas.
3. Las partículas de superficies lisas o esféricas (peat moss y materiales inorgánicos) se empaquetan de forma cerrada presentando un menor drenaje, a diferencia de las partículas rugosas (fibra de coco y materiales inorgánicos) que tienen un mayor drenaje, independientemente del tamaño de partícula.
4. La producción de *Lisianthus* en maceta a partir de sustratos en fibra de coco, la hace económicamente rentable.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se llevó a cabo en un invernadero ubicado en Santa Fé, México, D. F. ubicado a 2,432 msnm, a 19° 22' 47.64'' N y 99° 14' 33.66'' O.

4.1 Materias primas a emplear en la elaboración de mezclas de sustratos

Se emplearon ocho materiales para la formulación de sustratos, cuatro materiales orgánicos como fibra de coco, peat moss, composta y vermicomposta y cuatro inorgánicos como tezontle, perlita, piedra pómez y zeolita, y estos se caracterizaron física y micromorfológicamente de manera individual.

El origen de los materiales fue: la fibra de coco del estado de Colima; el peat moss de *Spaghnum* marca Sunshine® de Canadá; la composta y vermicomposta fueron elaboradas en el Colegio de Postgraduados ubicado en Texcoco, Estado de México, ambas a partir de la trituración de restos vegetales de jardines, estiércol de borrego y cabra y sustrato agotado de setas; el tezontle y la piedra pómez de una mina ubicada en Texcoco, Estado de México; la agrolita o perlita de la casa comercial Polietilenos del Sur y la zeolita de San Luis Potosí. Debido a que existen muchos tipos de zeolita que varían en cuanto a sus propiedades físicas y químicas y al desconocimiento específico de su procedencia, se realizó la identificación a través de la difracción de rayos X, la muestra de zeolita se molió finamente, se colocó en un porta muestras y la medición se realizó con la técnica de barrido a una velocidad de $4^\circ \cdot \text{min}^{-1}$ de 2 a $60^\circ 2\theta$.

4.2 Análisis físico de sustratos

Para la caracterización de los materiales, se realizaron determinaciones de densidad aparente (DA), densidad real (DR), espacio poroso total (EPT), retención de humedad (curva de liberación de agua) que genera los valores de capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR), agua difícilmente disponible (ADD) y materiales sólidos (MS) y análisis granulométrico; cada determinación se realizó por triplicado,

siguiendo la metodología para análisis de sustratos propuesta por Warncke (1986) y modificada por Ansorena (1994).

4.2.1 Densidad aparente y porosidad

Para la determinación de estas características se utilizaron macetas comerciales de 1 L de capacidad, las cuales se pesaron y llenaron hasta el borde a intervalos de 100 mL con el sustrato secado a peso constante a 105° C. Sobre el sustrato se aplicó un peso de 650 g por tres minutos para facilitar su asentamiento, agregando más sustrato cuando el volumen se reducía. Las macetas con el sustrato se pesaron nuevamente y se cubrieron en la parte superior con un plástico sujeto con una liga y se colocaron en una bandeja de plástico. A esta se le agregó agua a intervalos de media hora, para que penetrara lentamente por los orificios de la base de las macetas, con la finalidad de humedecer el sustrato por capilaridad. Se agregó agua a un recipiente hasta que su nivel coincidió exactamente con el nivel del sustrato dentro de la maceta. Una vez saturados los sustratos, se sacaron de las macetas para permitir que se drenara y posteriormente tomará el volumen equivalente a su manejo comercial en vivero. Este proceso se repitió tres veces. Después de la última saturación, y manteniendo las macetas dentro del agua, se taparon los orificios de la base con tapones de goma para evitar el drenado del agua. Se sacó del agua y se secaron por la parte exterior. Se colocaron sobre un embudo y se destaparon los orificios para dejar drenar el agua del sustrato durante 30 minutos sobre un recipiente colector y finalmente, se midió el volumen de agua colectado.

La densidad aparente se calculó a partir de:

$$D_a \text{ (kg L}^{-1}\text{)} = (P_2 - P_1) / V$$

donde:

P_2 = Peso de la maceta + peso del sustrato (g).

P_1 = Peso de la maceta (g).

V = Volumen de la maceta (L).

La porosidad de aireación se calculó a partir de:

$$P_a \text{ (\%)} = 100 V_1 / V_2$$

donde:

V_1 = Volumen de agua colectado (mL).

V_2 = Volumen del sustrato (mL).

4.2.2 Densidad real

Se pesó un matraz aforado de 100 mL (Pm), se añadió una cantidad de sustrato secado a 105° C y se peso nuevamente (Ps).

Se añadió agua destilada y hervida hasta aproximadamente la mitad del volumen del matraz, arrastrando hacia el interior las partículas de sustrato que quedaron adheridas a las paredes. Tras dejar reposar durante 24 horas se expulsó el aire, hirviendo lentamente el contenido del matraz durante unos minutos, se agitó suavemente para evitar la pérdida de sustrato por la formación de espuma. Se pesó (Psa) para después vaciarlo y limpiarlo. Se agregó hasta la mitad agua destilada hervida. Se puso en baño termostático a 20° C, y se enrasó con agua destilada hervida, enfriada a 20° C. Una vez que el contenido se sacó de este baño, se puso al exterior del matraz y se pesó (Pa). El valor de la densidad real del sustrato se obtuvo aplicando la fórmula:

$$Dr = Da (Ps-Pm) / (Ps-Pm) - (Psa-Pa)$$

donde:

Dr = Densidad real.

Da = Densidad del agua a 20° C.

4.2.3 Retención de humedad en sustratos

Esta característica, definida como el contenido de agua del sustrato a capacidad de contenedor, se refiere a la máxima cantidad de agua que puede retener un sustrato colocado en una maceta de 1 L, tras saturación y drenaje hasta el equilibrio (Martínez *et al.*, 1992); es equiparable al concepto de capacidad de campo en suelos agrícolas. Se determinó de acuerdo con el siguiente procedimiento: se pesó la maceta con el sustrato humedecido a capacidad de contenedor (PSH), a este valor se le restó el peso del sustrato seco (PSS), se dividió entre el volumen de la maceta y se multiplicó por 100.

Los resultados se expresaron como porcentaje de humedad en volumen

$$\text{Retención de humedad (\%)} = (PSH - PSS) / V \times 100$$

donde:

PSH = Peso del sustrato húmedo (g).

PSS = Peso del sustrato seco (g).

V = Volumen de la maceta (cm³).

4.2.3.1 Curvas de retención de humedad

Se empleó un equipo de succión, con embudos de placa filtrante de porosidad No. 4. Se tomó una muestra de 100 g de cada sustrato para determinar el contenido de humedad, se saturó la muestra añadiendo agua durante 24 horas y posteriormente se sometió a tensiones de 10, 50 y 100 cm de columna de agua (cm de c.a.) para construir la curva de retención, la succión aplicada, que genera los parámetros de CA, AFD, AR, ADD y MS se mantuvo durante 12 horas.

4.2.4 Análisis granulométrico

Para el análisis granulométrico se pesaron 100 gramos de sustrato secado al aire, se hicieron pasar por tamices con intervalos menores a 0.13; de 0.13 a 0.25; de 0.25 a 0.50; de 0.50 a 1; de 1 a 2 y mayores a 3.36 mm; en este caso para mayor facilidad del lector solo se reportaron los valores máximos de los tamices (<0.13 mm, 0.25, 0.5, 1, 2 y >3.36 mm). La tamizadora que se hizo funcionar a máxima amplitud durante 10 min, al cabo de ese tiempo se pesó el contenido de cada tamiz y del colector del fondo en recipientes tarados con una precisión de 0.1 g. Los resultados se expresaron como porcentaje en peso de cada fracción (histogramas de frecuencias).

4.3 Análisis micromorfológico

Para el análisis micromorfológico, cada tamaño de partícula se depositó en tubos de PVC de 7.5 cm de largo y 5.5 cm de diámetro. Las muestras se secaron al aire y se impregnaron con resina poliéster insaturada y monómero de estireno en una relación 7:3; posteriormente, se dejaron en gelación a la sombra por un lapso de 30 días. Una vez endurecidas se procedió a cortarlas con un disco de punta de diamante, se pulieron con abrasivos de carburo de silicio (carborondum) y óxido de aluminio (aloxita) hasta tener un espesor de 30 µm y se fabricaron secciones delgadas de un tamaño de 5 x 7.5 cm.

4.3.1 Tamaño de las partículas

La identificación y medición de los constituyentes en las secciones delgadas se realizaron con el microscopio petrográfico. La descripción del tamaño de las partículas se hizo mediante un enfoque descriptivo considerando tres niveles: a) descripción visual, a partir de la observación, b) comparación visual, con base a componentes de referencia, y c) medición directa, en los componentes. Los criterios generales fueron: la forma (redondez, esfericidad y rugosidad), distribución (básica y tipo de empaquetamiento) y poros (tipo, tamaño, acomodamiento y ubicación- inter e intra partículas), siguiendo la metodología de Bullock *et al.* (1985).

Ninguno de los materiales utilizados como sustratos se trituró, en el caso de los sustratos orgánicos (a granel) se tamizaron, mientras que en los inorgánicos se adquirió el tamaño de partícula deseada (excepto la perlita); sin embargo, éstos no presentaron tamaños homogéneos por lo que se procedió también al tamizado.

4.3.2 Análisis de imágenes

Las secciones delgadas se analizaron con un microscopio petrográfico marca Olympus, con aumentos de 2 hasta 20x, y se describieron con base en el manual elaborado por Bullock *et al.* (1985). Para determinar el porcentaje de partículas y poros (inter e intra), la sección delgada se cuadrículó cada 0.5 cm (150 cuadros) y se cuantificó cada rasgo localizado en las intersecciones de la sección delgada. La distancia entre partículas se determinó a través de una imagen de sección delgada digitalizada y agrandada de 7.5 x 5 cm a 22.5 por 15 cm. La imagen fue impresa en papel y se midió la distancia entre partículas con una regla.

4.4 Selección de mezclas

La combinación de materiales para la generación de mezclas se realizó con base en la caracterización física y micromorfológica de los diferentes sustratos, seleccionando aquellos que presentaron las mejores características de acuerdo al tamaño de partícula, densidad aparente, porosidad, retención de agua y los requerimientos del cultivo. Finalmente, se consideró como sustrato óptimo económico aquel que cumplió con la mejor calidad de plantas a un costo mínimo.

4.5 Análisis de las mezclas de sustratos

Se seleccionaron las mezclas siguiendo la metodología anterior; también se determinaron algunas características de porosidad del sustrato en campo, sellando las perforaciones del drenaje de las macetas y llenándolas con agua; se midió el volumen de agua de la maceta y se registró como “volumen de contenedor”, posteriormente se vació, se secó y se llenó con sustrato, saturándose lentamente el material y vertiendo gradualmente agua sobre la superficie. Se continuó agregando agua durante un período de varias horas, hasta que el sustrato quedó completamente saturado (superficie brillante), se registró el volumen total de agua “volumen total de poros” y se colocó la maceta en una superficie impermeable, removiendo el sello de las perforaciones del drenaje (tomando varias horas) para medir la cantidad de agua drenada, valor que se registró como “volumen de poros de aireación”; finalmente se procedió a calcular la porosidad total, la porosidad de aireación y la porosidad de retención de humedad con base en las siguientes formulas:

$$\text{Porosidad total (\%)} = \frac{\text{Volumen total de poros}}{\text{Volumen del contenedor}} \times 100$$

$$\text{Porosidad de aireación (\%)} = \frac{\text{Volumen de aireación}}{\text{Volumen del contenedor}} \times 100$$

$$\text{Porosidad de retención de humedad (\%)} = \text{porosidad total} - \text{porosidad de aireación.}$$

Esta metodología fue adaptada por Gessert (1976) y Whitcomb (1888).

4.6 Preparación de las mezclas de sustratos

Las mezclas que resultaron, se utilizaron para establecer el cultivo de *Lisianthus*, las cuales se prepararon en forma manual, midiéndose las proporciones de cada material con una probeta graduada de 1L, después se colocaron en bolsas de plástico para homogeneizarlas.

4.6.1 Esterilización y acondicionamiento de sustratos

Todas las mezclas de sustratos se esterilizaron para evitar problemas de patógenos durante el desarrollo del experimento. Para ello, se aplicó una solución compuesta de formol comercial (37%) relación 1:50 (1 L de formol en 50 litros de agua). Posteriormente, se selló el

sustrato con plástico y se dejó reposar 48 horas, teniendo la luz directa del sol; finalmente, se retiró el plástico y se ventiló por 10 días antes del llenado de macetas.

4.6.2 Transplante

El material vegetativo al momento del transplante tenía un tamaño de 5 cm (incluyendo la raíz -cepellón-) de altura y características deseables de calidad (raíz abundante y hojas libres de enfermedades). Las macetas se marcaron con su respectivo tratamiento para después llenarlas con las mezclas del sustrato correspondiente, sobre el cual se colocaron dos plantas de *Lisianthus* (*Eustoma grandiflorum*) serie Mermaid. Es importante mencionar, que antes de la siembra el cepellón se asperjó con una solución al 64% de un fungicida sistémico.

4.6.3 Manejo fitosanitario

Se realizaron monitoreos semanales para detectar la presencia de plagas y enfermedades y en función de esto, decidir la estrategia de control fitosanitario a seguir.

4.7 Diseño de tratamientos

Los factores de estudio fueron seis mezclas de sustratos, y tres tratamientos con diferentes granulometrías (a granel, mayores de 3.36 y 1 mm). El arreglo fue factorial 6 x 3 que originó 18 tratamientos, con cinco repeticiones cada uno (Cuadro 2). La unidad experimental estuvo representada por una maceta de 1 L de capacidad.

También se evaluaron como tratamientos dos testigos: la mezcla comercial de peat moss-perlita (67-33%) y la mezcla de peat moss-vermicomposta-tezontle (35-20-45%), ya que son materiales usados en la producción del cultivo de *Lisianthus*. Cabe mencionar, que estos materiales fueron a granel, no se tomó en cuenta el tamaño de las partículas. Lo anterior, se hizo con el propósito de comparar el desarrollo y la calidad comercial de las plantas cultivadas con este sustrato, con respecto a las demás.

Para la fertilización se aplicó la solución nutritiva universal Steiner (al inicio en una concentración de 30% y posteriormente al 50%). La composición química de la solución universal Steiner (1984) fue de KH_2PO_4 (1g/L); K_2SO_4 (3 g/L); $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (4 g/L);

Ca(NO₃) · 4H₂O (9 g/L); KNO₃ (3 g/L); solución de micronutrientos (1 mL/L) y Fe-EDTA (1 mL/L).

4.8 Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental en bloques completamente al azar con cinco repeticiones.

Cuadro 2. Diseño de tratamientos con base a la caracterización física y micromorfológica de mezclas de sustratos.

Mezclas	Tamaño de partícula		
	Granel	3.36 mm	1 mm
M1 (FC+T-60:40) ¹	M1T1	M1T2	M1T3
M2 (FC+PP-60:40)	M2T4	M2T5	M2T6
M3 (FC+P-60:40)	M3T7	M3T8	M3T9
M4 (PM+T-60:40)	M4T10	M4T11	M4T12
M5 (PM+PP-60:40)	M5T13	M5T14	M5T15
M6 (PM+P-60:40)	M6T16	M6T17	M6T18
M7 (PM+P-67-33)	M7T19		
M8 (PM+VC+T-35-20-45)	M8T20		

¹M = Mezcla, FC = Fibra de coco, PM = Peat moss, T = Tezontle, PP = Piedra pómez, P = Perlita y VC = Vermicomposta.

4.9 Variables a evaluar en el cultivo de *Lisianthus (Eustoma grandiflorum)*

Se midieron las siguientes variables: de calidad comercial (número de botones florales), altura final de las plantas, abundancia de raíces (peso de materia fresca y seca de la parte radical), peso de materia fresca y seca de la parte aérea de las plantas. Se realizó un muestreo destructivo a la mitad del experimento (7 semanas), para determinar el crecimiento del cultivo (abundancia de raíces -peso de materia fresca y seca de la parte radical-, peso de materia fresca y seca de la parte aérea de las plantas).

4.10 Análisis estadístico

Los análisis estadísticos de la información correspondieron a: análisis de varianza de las variables de respuesta de la planta en las diferentes mezclas de sustratos, de acuerdo con el diseño de tratamientos. También se correlacionaron las variables de las características físicas y micromorfológicas de los diferentes materiales orgánicos e inorgánicos, así como de las mezclas que se generaron a partir de éstos.

Los datos de la evaluación de las variables de respuesta, así como los análisis físicos y micromorfológicos se sometieron a un análisis de varianza, y posteriormente a una prueba de comparación de medias a través de la prueba de Tukey con una $p < 0.05$, para ello se utilizó el programa Statistical Analysis System de SAS Institute. La comparación se realizó contra los dos tratamientos testigos (mezcla peat moss-perlita 67-33% y peat moss-vermicompostatezontle 35-20-45%).

4.11 Determinación de la eficiencia del agua en mezclas de sustratos para la producción de *Lisianthus*

Las macetas utilizadas fueron de plástico con un litro de capacidad. Las mediciones se iniciaron a partir de la tercera semana después del trasplante. Posteriormente, se registró diariamente el peso de cada maceta, para determinar por diferencias de peso las láminas aplicadas en cada tratamiento (el riego fue por goteo), para lo cual se recolectó el agua drenada, colocándose platos de poliestireno en la parte basal de la maceta. La frecuencia se decidió de acuerdo a lo señalado por Heiskanen (1995) que mencionó que los contenedores requieren riegos más frecuentes o más largos dependiendo de las mezclas de sustratos.

Las prácticas de fertilización y aplicación de pesticidas se realizaron de acuerdo al desarrollo del cultivo; durante la fase de campo se midió la conductividad eléctrica (CE) y el pH de los lixivididos del sustrato, para determinar y evaluar el efecto de cada tratamiento, sobre éstas variables y sus posibles consecuencias en el crecimiento de las plantas. Posteriormente, se realizó una diferencia entre la CE inicial y final para conocer la cantidad de sales presentes en el sustrato.

4.12 Análisis económico de las mezclas de sustratos

Se realizó un análisis económico para determinar si los sustratos alternativos al peat moss pueden ser competitivos en precio, para ello se tomó en cuenta el ingreso neto obtenido por la venta de las plantas. Se consideraron los costos de producción de las plantas, el ingreso neto y total. Los costos de producción incluyeron: costo de los materiales, proceso de mezclado y tamizado de los sustratos, macetas, material vegetativo, mano de obra, manejo fitosanitario, fertilización y aplicación de agroquímicos; estos costos se expresaron por maceta, considerando el tiempo de producción. Las mejores mezclas de sustratos se determinaron con base en: tiempo de producción según costo y oportunidad de la producción de la maceta, ingresos netos y relación beneficio-costos. El ingreso total se obtuvo a partir del precio de venta de la planta, al momento de que alcanzó su máximo desarrollo y el ingreso neto correspondió a la diferencia entre el ingreso y el costo total.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización de los sustratos orgánicos e inorgánicos es indispensable para tener una mezcla. A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada uno de estos materiales.

5.1 Fibra o polvo de coco

La fibra de coco (*Cocos nucifera* L.) es un material orgánico procedente del mesocarpio, subproducto de la industria aceitera de coco como resultado del desfibrado del mismo. Esta integrada principalmente de restos de fibras y polvo (aspecto similar al peat moss), compuestas de lignina (45%) y celulosa, características que le proporcionan una lenta degradación (Handreck y Black, 1994; Meggelen-Laagland, 1995).

Presenta dos tipos de material: uno de aspecto similar al corcho, de poro abierto y de gran capacidad de absorción de agua y capilaridad, y el otro, de fibras de longitud variable (hasta 4 cm). La fibra coco tiene dos problemas fundamentales: la heterogeneidad y la salinidad (sodio y cloro), provocados por el proceso de desfibrado y origen del material (regiones costeras) (Evans *et al.*, 1996; Burés, 1997; Abad *et al.*, 2002; Nogera *et al.*, 2003).

Constituye un material con un gran potencial para ser usado como sustrato, debido a su gran capacidad de retención de agua y su estabilidad como sustrato orgánico, por lo que se puede considerar un sustituto del peat moss (Abad *et al.*, 2003; Nogera *et al.*, 2003).

5.1.1 Análisis micromorfológico

5.1.1.1 Porosidad

a. Tipo de poros

El análisis micromorfológico de la fibra de coco mostró que forman poros de empaquetamiento compuesto sobre todo en partículas mayores de 1 mm; cavidades y vesículas en partículas menores que 0.50 mm (Figura 2a-f).

De acuerdo con Bullock *et al.* (1985), los poros de empaquetamiento compuesto ocurren entre agregados granulares y migajosos y son de origen biológico (comunes en materiales orgánicos). Estos poros se caracterizan porque son permanentes (no se destruyen por la presencia de agua) y continuos (cuando hay comunicación entre ellos) (Pape y Lager, 1995). En el caso de las cavidades y las vesículas, Pape y Lager (1995) señalaron que las primeras se originan por el acomodamiento de agregados granulares y bloques subangulares (generalmente como resultado de la degradación de la estructura), mientras que las vesículas se forman a consecuencia del atrapamiento de gases.

La fibra de coco es un material orgánico, por lo que se esperaría la dominancia de poros de empaquetamiento compuesto; sin embargo, el tamaño fino de las partículas debe de estar influyendo en su reorganización y atrapamiento de gases para que se hayan formado vesículas y cavidades.

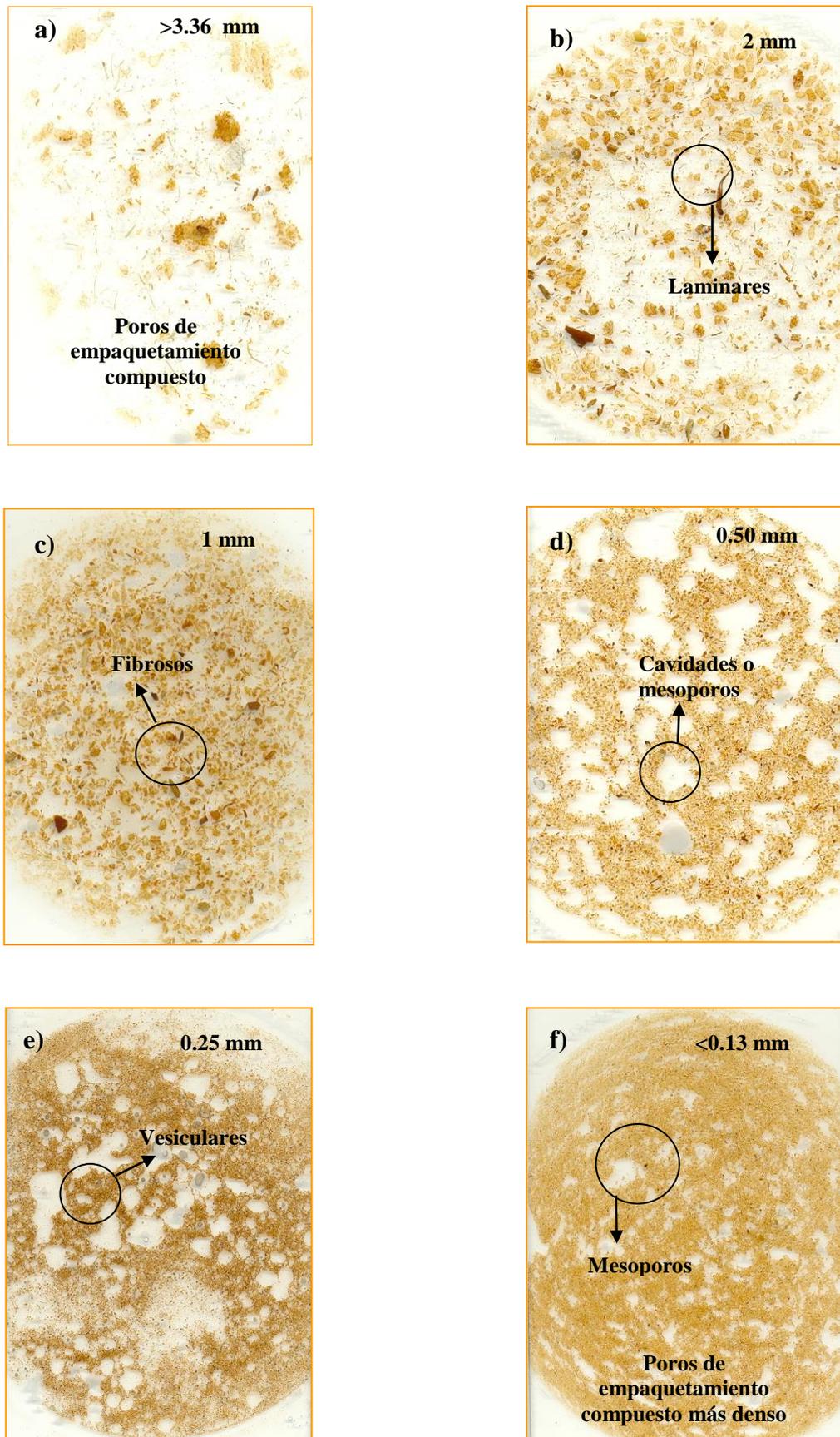


Figura 2. Secciones delgadas de fibra de coco en diferentes tamaños de partícula, (dimensión de la sección delgada 5 x 7.5 cm).

b. Tamaño de poros

En la fibra de coco existen macroporos (0.01 a 1 mm) y mesoporos (0.05 a 0.01 mm) entre las partículas (inter) y microporos (<0.05 mm) dentro de las partículas (intra). Brady y Weil (1999) mencionaron que los macroporos tienen una función percolante (eliminación del agua) y los microporos una función de almacenamiento (retienen agua y nutrimentos). Sin embargo, Pape y Lagger (1995) señalaron que el tipo de macroporos no siempre presentan una función percolante, debido a que pueden o no estar conectados y ser o no permanentes; por ejemplo, las vesículas presentan macroporos, pero no drenan debido a que no se encuentran conectadas.

Raviv *et al.* (2002) mencionaron que los tamaños de partículas muy pequeños forman granos individuales y una larga superficie específica, los cuales permiten una mayor fluidez en el paso de moléculas de agua. Por otro lado, se debe tomar en cuenta que el incremento de los microporos generan un aumento en la continuidad de los poros.

c. Ubicación de los poros (inter e intra)

Los poros inter e intra partícula varían con el tamaño de las partículas y no tienen una tendencia lineal (Cuadro 3); por ejemplo, se encontró que el mayor porcentaje de poros inter partícula se presentó en partículas de 0.25 mm (83.3%) y menor porosidad intra partícula (16.7%); caso contrario fueron las partículas de 1 mm, las cuales presentaron el menor porcentaje de poros entre partícula (59%) y el mayor porcentaje de poros intra partícula (41%) (Cuadro 3 y Figura 3a). De acuerdo con la información generada por Brady y Weil (1999) en cuanto a la función del tamaño de poros, se esperaría que las partículas de 0.25 mm presentaran una mayor percolación y menor capacidad de almacenamiento de agua; mientras que las partículas menores que 1 mm, tendrían la misma capacidad tanto de percolar como de almacenar agua.

Cuadro 3. Tipos de poros en diferentes tamaños de partícula en fibra de coco.

Descripción		Tamaño de partícula (mm)					
		<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Orden (%)	<i>Inter partícula</i>	76	83.3	69	59	72.4	67.5
	<i>Intra partícula</i>	24	16.7	31	41	27.6	32.5
Poros (%)	<i>P. E. Simple¹</i>						
	<i>P. E. Compuesto</i>	100	100	100	100	100	100
	<i>P. E. Complejo</i>						
	<i>Vesícula</i>						
	<i>Fisuras</i>						
Forma (%)	<i>Vesícula</i>						
	<i>Tubular/Capilar</i>			3	10	7	6.7
	<i>Fibrosa</i>				11.5	12	1.7
	<i>Irregular</i>	100	100	97	78.5	81	91.6
	<i>Acicular</i>						
	<i>Laminar</i>						
	<i>Fisuras</i>						

¹P. E. = Poros de empaquetamiento.

En trabajos relacionados con componentes fibrosos se encontró que la corteza de pino, tiene una influencia dominante en el suministro del agua. Richards *et al.* (1986) trabajaron con tres grupos de partículas: gruesa (tres niveles: <9.50, 9.50-4.75 y 4.75-2 mm); media (tres niveles: 2-1, 1-0.50 y 0.50-0.25 mm) y fina (dos niveles: 0.25-0.10 y <10 mm), y concluyeron que el agua total, la disponibilidad de agua y los días de humedecimiento se incrementaron en partículas menores que 2 mm de diámetro. Por su parte, Handreck (1983) indicó que el incremento en la proporción de pequeños poros inter partícula y el decremento de los mismos, deja que los poros drenen libre y rápidamente el agua, mejorando así la disponibilidad de ésta. Airhart *et al.* (1978) y Pokorny y Wetzstein (1984) mencionaron que las partículas de corteza de pino absorben grandes cantidades de agua a nivel interno. Sin embargo, la trituración de los materiales reduce el tamaño de las partículas, debido a que el espacio interno de los poros, tienen una mayor absorción del agua. Es probable que los diversos tamaños de partículas influyan en las propiedades de porosidad interna y la superficie de absorción.

d. Forma y frecuencia de los poros intra

Los poros intra partícula son de tipo irregular, tubular/capilar, conectados y no conectados (Figura 2c-f), éstos tipos de poros varían con el tamaño de partícula (Cuadro

3); por ejemplo, en partículas mayores que 1 mm, se presentaron los tres tipos, mientras que en partículas menores de 1 mm sólo dominan los poros irregulares (Figura 3b-d).

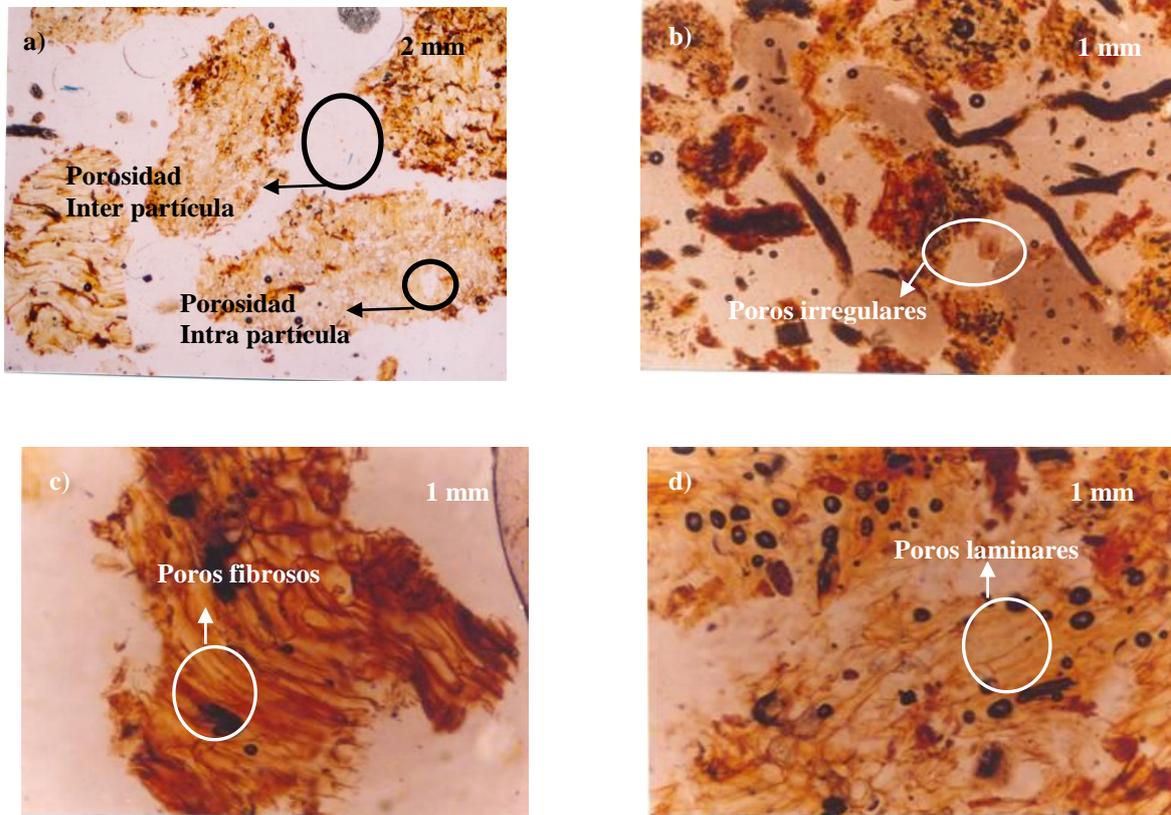


Figura 3. Fibra de coco: a) porosidad inter e intra partícula, b-d) forma de poros (longitud del marco 5.3 mm LPP).

e. Diámetro de poros

De acuerdo con la distancia que hay entre partícula y partícula se encontró que dominan los diámetros de 0 a 700 μm (Cuadro 4). En partículas mayores que 3.36 mm se presentó una mayor variedad de distancias, debido a una mayor complejidad de formas, por lo que se observaron poros entre 0 y 1000 μm ; mientras que las partículas más pequeñas (<1 mm) y con mayor homogeneidad de formas, los diámetros de poros fueron entre 0 y 300 μm . Es probable que el diámetro de poro y el tipo de formas estén relacionados con la capacidad de aireación y disponibilidad de agua. Es importante mencionar, que se presentaron mesoporos o cavidades en partículas menores de 1 mm (entre 50 y 1000 μm).

Cuadro 4. Porcentaje de ocurrencia del diámetro de poros en fibra de coco.

Tamaño de partícula (mm)	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Diámetro de poro (μm)	Ocurrencia (%)					
0-50	83.4	70	56.7	23.3	6.7	3.3
50-100	13.3	23.3	30	43.4	16.6	6.7
100-200	3.3	6.7	10	13.3	46.7	23.3
200-300			3.3	20	26.7	20.0
300-500					3.3	16.7
500-700						23.3
700-1000						6.7
> 1000						

5.1.1.2 Partículas

a. Forma

La fibra de coco se caracteriza por presentar diferentes tipos de formas: redonda-alargada-lisa, subredonda-angular-rugosa, subredonda-subangular-rugosa, subangular-ondulada-lisa, onduladas-subredondas-lisa, onduladas-redonda-alargada y ondulada-subangular-lisa, tubulares y laminares redonda-alargada-lisa (Figura 4). Esto significa que el material es muy complejo; sin embargo, la diversidad se disminuye conforme el tamaño de partícula se reduce. En las partículas más finas sólo se encontró la forma subangular-lisa.

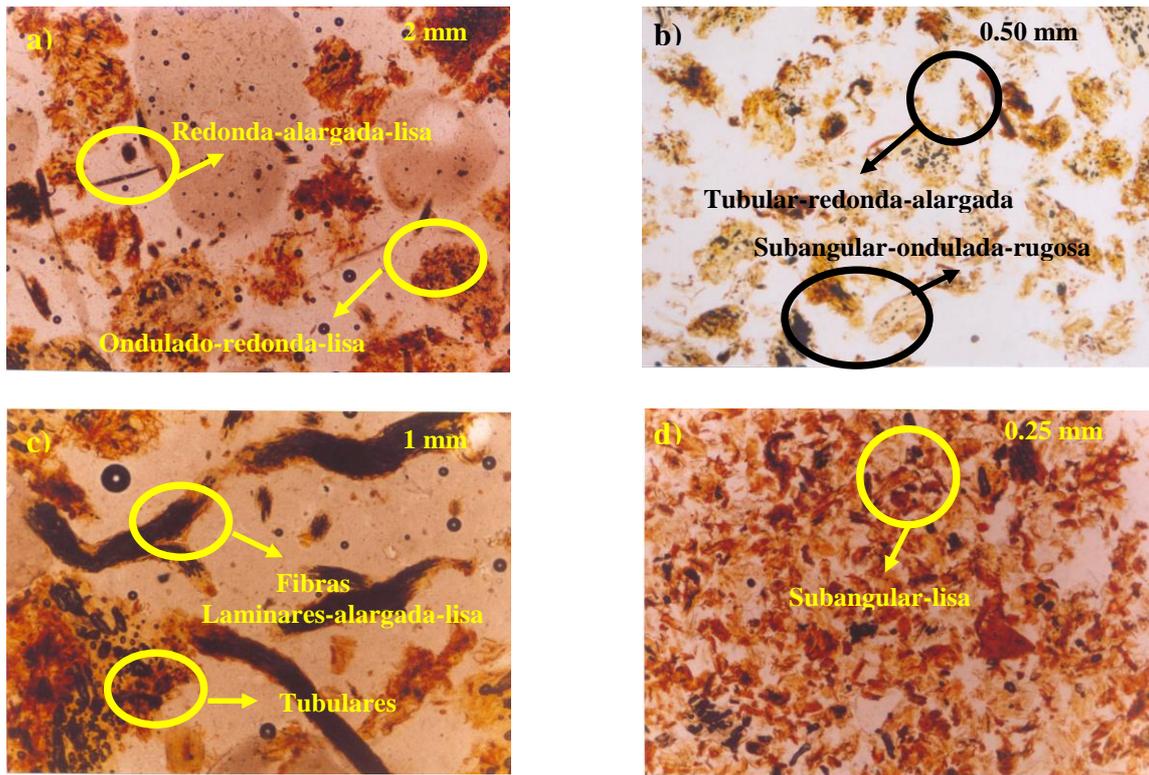


Figura 4. Formas de partículas en fibra de coco (longitud del marco 5.3 mm LPP).

5.1.2 Propiedades físicas

La caracterización física implica el estudio de la densidad aparente y real, granulometría, espacio poroso total y las relaciones agua/aire (Raviv *et al.*, 1984; Bunt, 1988; Bures, 1997).

a. Tamaño de las partículas

Las partículas que componen a los sustratos pueden tener diversos tamaños y su distribución se expresa mediante la granulometría. La importancia de conocer el tamaño y organización de las partículas, reside en que estas definen el tamaño de los poros situados entre ellas y las propiedades físicas como la retención de humedad (Burés, 1997).

Los resultados del tamaño de partícula de la fibra de coco a granel se reportan en el histograma de frecuencias de la Figura 5 y se observó que hay una mayor cantidad de partículas menores de 1.0 mm (62.4%).

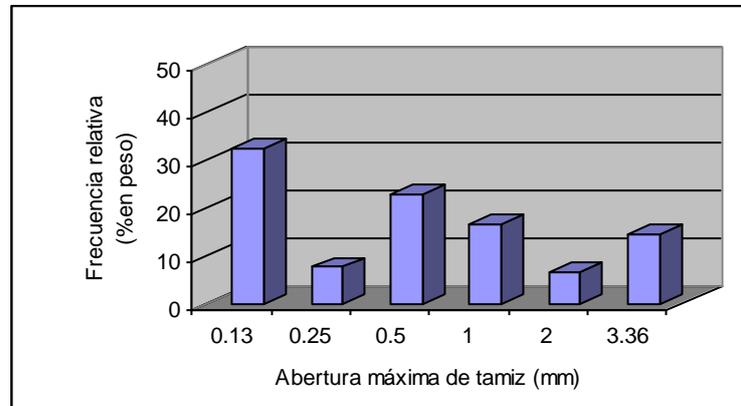


Figura 5. Histograma de frecuencias para la distribución granulométrica en fibra de coco.

Evans *et al.* (1996) realizaron un estudio con cinco muestras de polvo de coco y reportaron una dominancia de partículas entre de 0.5 a 2 mm. En la producción de cultivos en maceta, la porosidad está determinada principalmente por el intervalo de las partículas presentes en el sustrato (Handreck y Black, 1984).

b. Densidad aparente (DA)

Es la relación entre la masa o peso de las partículas y el volumen que ocupan, sin importar el tipo de poros (Ansorena, 1994).

Al realizar el análisis de varianza no se encontraron diferencias significativas entre el tamaño de partícula y los valores de DA. El comportamiento de los valores de DA fueron irregulares (desde 0.08 a 0.13 g cm⁻³), sin ninguna tendencia lineal (Cuadro 5). Estos resultados se encontraron dentro de los intervalos que se reportaron en la literatura (0.08-0.12 g cm⁻³) (Nogera *et al.*, 2000; Calderon y Cevallos, 2003; Kang *et al.*, 2004). La DA en fibra de coco fue muy baja, lo que significa que hay un alto porcentaje de poros.

Cuadro 5. Densidad aparente y real en diferentes tamaños de partícula en fibra de coco.

Densidad (g cm ⁻³)	Tamaño de partícula (mm)					
	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Aparente	0.13 a ¹	0.10 a	0.09 a	0.08 a	0.08 a	0.10 a
Real	1.50 a	1.35 c	1.34 c	1.41 b	1.25 d	1.36 c

¹Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes dentro de cada hilera (Tukey, $p < 0.05$).

Los materiales orgánicos no siempre presentan un comportamiento irregular; por ejemplo, Pokorny y Henny (1984) trabajaron con diferentes tamaños de partículas de corteza de pino (4.76, 2.38, 2, 1, 0.84, 0.60, 0.42 mm) y encontraron que la densidad aparente aumentó cuando disminuyó el tamaño de partícula (de 0.23 a 0.39g cm⁻³ en partículas de 4.76 a 0.42 mm, respectivamente). Este comportamiento se presentó sólo a partir de partículas menores de 2 mm. Las partículas más pequeñas pueden tener una densidad mayor, por empaquetamiento, aunque la composición de las partículas y su estructura pueden estar contribuyendo a la distribución del agua (Robertson *et al.*, 2000).

En suelos arcillosos y limosos se han reportado densidades aparentes de 0.8 a 1.25 g cm⁻³ y en arenas de 2.0 g cm⁻³; esto se debe a la formación de agregados granulares, que pueden presentarse, originando poros intra y entre partícula que proporcionarían un alto espacio poroso (Brady y Weil, 1999). Dentro de los suelos de texturas finas, Verdonck y Penninck (1986) señalaron que las partículas tienden a empaquetarse más cerradamente, por lo que presentan densidades aparentes elevadas.

Handreck y Blanck (1991) reportaron que el empaquetamiento de las partículas aumenta con las partículas de menores tamaños, debido a que incrementan su compresibilidad y disminuyen la porosidad interna, afectando su movilidad o disposición en el espacio (estereometría). Sin embargo, de acuerdo con las secciones delgadas elaboradas en los sustratos, el arreglo de las partículas puede cambiar con el tamaño; es decir, no siempre se acomodan en forma de empaquetamiento. En la Figura 2a-f se muestra que en partículas mayores de 3.36 mm el arreglo se presenta en forma de empaquetamiento compuesto, mientras que las partículas menores de 0.13 mm, si bien su arreglo es más denso, el empaquetamiento no es lineal debido a que se generan macro poros de tipo cavidad (mesoporos). Esta nueva reorganización puede ser la explicación del

porque la fibra de coco no tiene una tendencia lineal y sólo se encuentre en partículas menores de 2 mm (Figura 2a-f). Por lo tanto, aunque el tamaño de las partículas de la fibra de coco éste relacionado con la DA, el arreglo de las partículas (empaquetamiento) no siempre se cumple.

c. Densidad real (DR)

Es el cociente entre la masa de las partículas del sustrato y el volumen que ocupan, sin considerar los poros y su valor es propio del material (Ansorena, 1994).

Los resultados mostraron que la fibra de coco presentó una densidad real variable (entre 1.25 y 1.50 g cm⁻³) (Cuadro 5), mostrando valores estadísticamente diferentes. Nogera *et al.* (2000) reportó valores para fibra de coco de 1.50 g cm⁻³.

La variación de la DR en los diferentes materiales, o inclusive dentro de un mismo tipo, debe estar relacionado con el empaquetamiento o arreglo, tipo y forma de las partículas. Por ejemplo, en tamaños mayores, la fibra de coco presentó diversas formas (onduladas-subredondas, onduladas-redonda-alargada y ondulada-subangular-lisa) lo que originó más espacios vacíos (Cuadro 3 y Figura 4); mientras que las partículas menores que 0.13 mm sólo presentaron una forma de partícula (subangular-lisa-ondulada), es decir, se homogeneizaron.

La porosidad de un sustrato puede variar según las características y el grado de compactación, ya que la formación de poros laminares presenta un empaquetamiento más denso, mientras que en las formas esféricas el empaquetamiento es menor. Esto puede ser una explicación del comportamiento irregular de la DR de la fibra de coco.

Se realizó un diagrama con partículas heterogéneas y homogéneas (Figura 6); presentandose diferentes formas (Figura 6a); las partículas tuvieron un acomodamiento suelto quedando un mayor número de espacios vacíos, mientras que cuando las partículas presentaron formas homogéneas (Figura 6b), la compactación fue mayor.

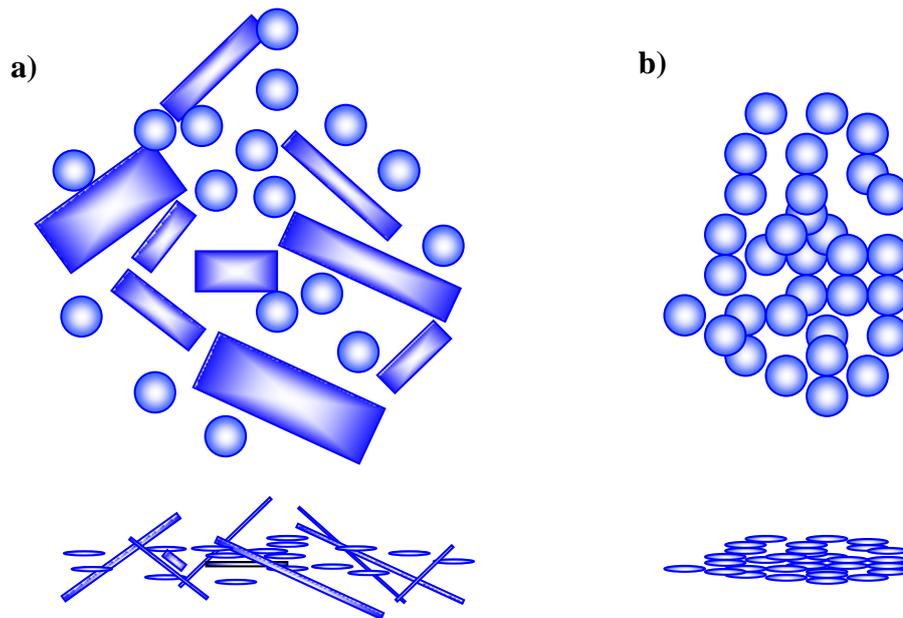


Figura 6. Acomodamiento de partículas de acuerdo con la variedad y frecuencia de formas: a) acomodamiento más suelto, dominan partículas de diferentes formas y tamaños, b) acomodamiento denso, domina un solo tipo de partícula.

Burés (1999) señaló además que la densidad real puede variar dependiendo del método de trituración que se utilice puesto que se eliminan los poros. Esta autora trabajó con diferentes materiales (arena, perlita y corteza de pino) y tamaños de partícula (de 0.25 a 1.00 mm), y encontró diferencias en las densidades reales. Estos resultados no son contradictorios con los datos obtenidos en este estudio, debido a que la trituración o molienda también puede generar diferentes formas.

d. Espacio poroso total (EPT)

Es el porcentaje de espacios vacíos (poros percolantes o no), y se calcula a partir de la densidad aparente y real con la cual se encuentra relacionada (Burés, 1998). Las diferencias entre los valores de EPT no fueron significativas y el EPT fue mayor a 91% en todos los tamaños de partícula, similar a lo reportado por Nogera *et al.* (2000) y Arenas *et al.* (2002).

El mayor EPT se presentó en partículas de 1 mm de diámetro con 94.33% (Cuadro 5), debido a que las partículas se expandieron y generaron poros de formas laminares, fibrosas e irregulares, estando en función al tamaño, forma y el arreglo de las partículas

individuales de la fibra coco. Sin embargo, este cambio también se puede atribuir a la variable de DA, pero sobre todo con la DR, donde la organización y forma de las partículas, generan un volumen y peso diferente por estar íntimamente relacionadas (Handreck y Blanck, 1991).

La variación en el EPT se atribuye al tamaño de los poros que se producen al aumentar la compactación. A partir de partículas menores de 1mm, la DA se incrementó y el EPT disminuyó. Este fenómeno se debe a la compresibilidad de las partículas, lo que provocó que disminuyera la porosidad interna ocupada por el aire y aumentara la retención de agua. Sin embargo, la formación de mesoporos o cavidades de diferentes tamaños son un factor que está determinando que exista un aumento o disminución en cuanto a retención de agua (Cuadro 6).

Martínez *et al.* (1997) trabajaron con tres diferentes tipos de fibra de coco y reportaron valores de espacio poroso total de 94.4, 94.9 y 95.8%; capacidad de aireación de 34.1, 42.6, y 40.3% y agua fácilmente disponible de 22.8, 21.4 y 21.1%, teniendo pocas diferencias en los materiales. Sin embargo, no mencionaron el origen de éstos y el tamaño de partícula usado.

Cuadro 6. Porosidad y retención de agua en diferentes tamaños de partícula en fibra de coco.

Porosidad y retención de agua (%volumen)	Tamaño de partícula (mm)					
	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
EPT ²	91.33 a ¹	92.59 a	93.28 a	94.33 a	93.60 a	92.65 a
CA	46.8 a	27.6 d	24.2 e	16.1 f	30.7 c	35.6 b
AFD	12.2 c	28.2 a	11.6 c	3.5 e	13.6 b	8.1 d
AR	2.6 e	8.6 d	16.5 b	18.1 a	0.9 f	12.2 c
ADD	29.7 e	28.2 e	40.9 c	56.6 a	48.4 b	36.8 d
MS	8.67 a	7.41 a	6.72 a	5.67 a	6.40 a	7.35 a

¹Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes dentro de cada columna (Tukey, p<0.05).

²EPT = Espacio poroso total, CA = Capacidad de aireación, AFD = Agua fácilmente disponible, AR = Agua de reserva, ADD = Agua difícilmente disponible y MS = Material sólido.

La compresibilidad esta relacionada con la retención de agua, debido a que se observó un efecto del tamaño de partícula; asimismo se puede presentar una distribución diferente, formando empaquetamientos más compactos por el tipo de poros que se generaron (Figura 7). Las partículas pueden tener lugar a la compresibilidad o deformación

llegando a un máximo de disminución de la porosidad, lo que correspondería a empaquetamientos ordenados. Cabe mencionar, que la fibra de coco presentó partículas altamente deformables (fibrosas y laminares).

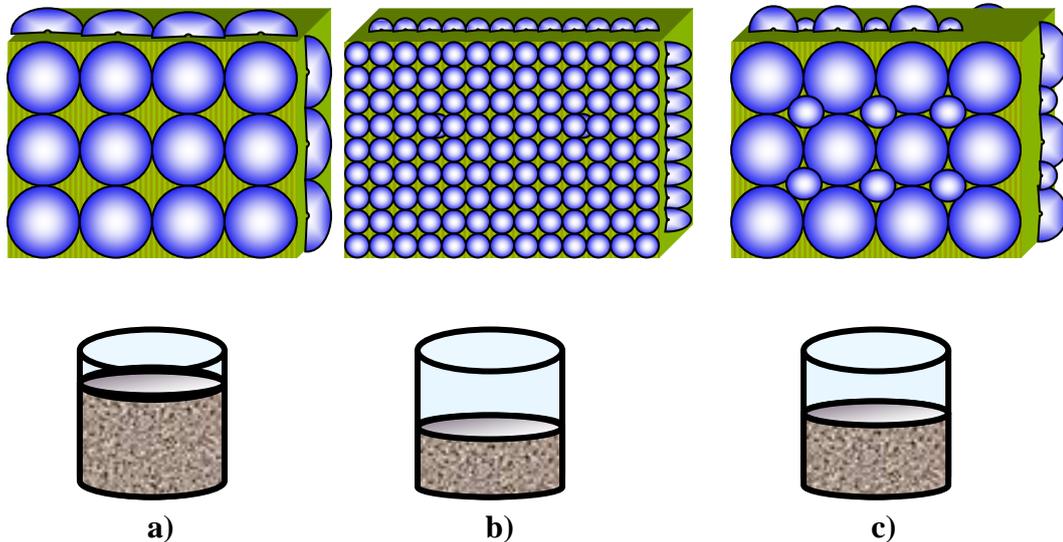


Figura 7. Porosidad del sustrato: a) macroporos generados por partículas gruesas, b) microporos por partículas finas y c) mezcla de ambos (los cilindros de la parte inferior contienen el mismo peso y ejemplifican el volumen que ocuparían según la porosidad que representan).

El EPT no establece las características de un sustrato, debido a que están determinadas por la CA, AFD, AR, ADD y MS y dependerán del objetivo de los productos y materiales usados en las mezclas, ya que un sustrato puede tener una elevada porosidad total y tener poca retención de agua (Verdonck *et al.*, 1984).

e. Retención de agua

El comportamiento de las partículas de fibra de coco en cuanto a la capacidad de aireación y retención de agua (fácilmente disponible, de reserva, o difícilmente disponible) (Cuadro 6) mostró valores estadísticamente significativos, siendo diferentes dependiendo del tamaño, forma y distancia de las partículas.

De acuerdo con Brady y Weil (1999), las partículas del suelo que presentan tamaño de arena tienen mayor capacidad de aire, debido a que las fuerzas de cohesión son menores por la baja superficie específica, mientras que en las partículas con tamaño de arcilla, las fuerzas de cohesión se incrementan y por lo tanto, también la capacidad de retener

humedad. La fuerza de capilaridad y adhesión relativamente retienen poca agua y es drenada por gravitación (Gruda y Schnitzler, 2004). Los diferentes tamaños de partícula analizadas en la fibra de coco corresponden al intervalo de tamaño de arena y grava, así que se planteó la hipótesis de que su relación con la retención de humedad está en forma proporcional o inversamente proporcional. Bohne y Gunther (1997) mencionaron que una reducción en el tamaño de partícula lleva a un decremento en la capacidad de aireación, aunque esto no siempre se cumple. Scharpf (1997) mencionó que existen correlaciones entre partículas menores o iguales a 1 mm de materiales fibrosos y el volumen de aire y agua.

Puustjärvi (1982) reportó que el mejor sustrato es el material de textura media a gruesa, con una mejor distribución de tamaño de poros que retienen suficiente agua (fácilmente disponible) y presentan una capacidad de aireación adecuada; mientras que los materiales finos (partículas menores de 1 mm) tienen poros de menor tamaño, retienen grandes cantidades de agua difícilmente disponible y presentan menor capacidad de aireación; concluyó que los mejores sustratos son fibra de coco y peat moss. En el caso de las partículas de 0.25 y 0.50 mm presentaron valores intermedios de CA de 27.6 y 24.2 %, respectivamente y AR de 8.6 y 16.5%, respectivamente, en el caso de las partículas de 0.25 mm se presentó la mayor cantidad de AFD (28.2%) y el menor valor de ADD (28.2 %). Al respecto, Will (1984) mencionó que el tamaño de partícula debe estar en los rangos de 0.5 a 2 mm de diámetro, ya que es donde se presentan los valores más altos de espacio poroso (>80%) y capacidad de retención de agua. Nogera *et al.* (2003) mencionaron que las fracciones menores de 0.5 mm en polvo de coco presentaron una influencia sobre la relación agua/aire; esto concuerda con Handreck (1983) quien trabajó con varios sustratos (corteza de pino y arena), y observó que la fracción de 0.25 a 0.50 mm presentó un mayor efecto sobre la CA y disponibilidad de agua.

Los resultados de retención de agua en fibra de coco contrastan con los encontrados en este estudio, debido a que el tamaño de partícula de 0.25 mm de fibra de coco fue la que presentó una mayor cantidad de AFD (28.2%); una explicación a este fenómeno es la formación de mesoporos que se originaron debido al acomodamiento y forma de las partículas.

En el Cuadro 6 se puede apreciar que las partículas mayores de 3.36 mm, no son precisamente las que presentaron la mayor CA (35.6%), sino las partículas de 0.13 mm

(tamaño de arena fina) (46.8%); mientras que el menor valor se encontró en partículas de 1mm (16.1%). Cuando se compararon estos resultados con el tipo y la distancia del poro, se encontró que en las partículas de 0.13 mm dominaron los poros de 0 a 200 μm (100%) y los poros inter partícula (76%) características que permiten la percolación y la disponibilidad de agua. En las partículas mayores de 3.35 mm (con 67.5% de poros inter partícula con tamaños entre 0 y 1000 μm) se esperaba una mayor percolación, sin embargo, la capacidad de aireación fue de 35.6%. La respuesta a este comportamiento se puede encontrar en el número de poros intra partícula (32.5%) que son los que retienen la humedad. El agua almacenada es difícilmente disponible (36.8%). En el caso de las partículas de 1 mm, el tamaño de poros fue entre 0 y 300 μm (100%) con 41% poros intra partícula, factores que impiden el drenaje de agua y la retienen fuertemente (56.6%) (Cuadro 6).

En la literatura se menciona que poros menores de 100 μm almacenan el agua, mientras que los de mayor tamaño la percolan siempre y cuando se presenten poros inter partícula, porque nunca se refieren a poros intra partícula. No obstante, esto es parcialmente verdadero, pues los poros intra (independientemente de su tamaño) pueden modificar la capacidad de aireación y almacenamiento de agua haciéndola difícilmente disponible.

Es necesario resaltar que la reducción en el tamaño de las partículas tiene un efecto significativo en la estructura física de las fibras, la cual se encuentra relacionada con las propiedades de hidratación, tales como la capacidad de retención agua y la capacidad de hinchamiento de las partículas. Estas propiedades de hidratación fueron estudiadas en diferentes tamaños de partícula de fibra de coco y se encontró que la disminución en el tamaño éstas (de 1127 a 550 μm) provocan un aumento en las propiedades de hidratación y viceversa (Roberstson *et al.*, 2000). Cadden (1987) y Raghavendra *et al.* (2006) reportaron que el incremento en las propiedades de hidratación, puede atribuirse al rompimiento de las paredes celulares y al colapso de la estructura, ya que al pasar por un proceso de trituración se incrementa en teoría el área superficial y el volumen de poros totales, teniendo una mayor accesibilidad del agua en las superficies capilares; mientras que el decremento en las propiedades de hidratación pueden atribuirse a la matriz fibrosa que compone el material y al colapso de los poros durante la molienda (Auffret *et al.*, 1994).

La capilaridad es la capacidad que tiene un sustrato de absorber agua a través de los microporos y de transportarla en todas direcciones. La más importante de todas las direcciones es la vertical, ya que en ella se realiza el transporte de agua en contra de la gravedad (capilaridad ascensional). Cuando un sustrato no presenta capilaridad, el agua se mueve verticalmente a través del perfil del mismo, llegando rápidamente al drenaje y dejando zonas secas, en las cuales no se desarrolla el sistema radicular; en cambio cuando el sustrato presenta capilaridad, el agua es repartida en todas las direcciones (Calderón y Cevallos, 2003). Esta propiedad es importante para los sustratos, ya que de ella dependerá la distribución del agua.

f. Curva de liberación de agua

La curva de liberación de agua es importante para los sustratos, ya que determina las características de retención de ésta en cada uno de los materiales (De Boodt *et al.*, 1974). Los resultados de la curva de liberación de agua se muestran en la Figura 8, y se observó que el tamaño de partícula influye en la liberación de agua. Los sustratos deben presentar una elevada porosidad y capacidad de retención de agua, asociados con un drenaje rápido y buena aireación que le permitan cumplir correctamente las funciones de regulación en el suministro de agua y aire (Milks *et al.*, 1989).

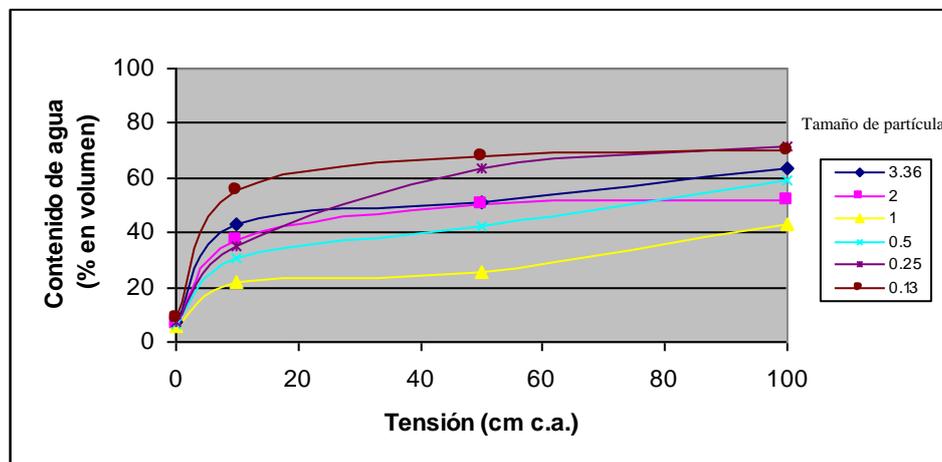


Figura 8. Curva de liberación de agua para fibra de coco en diferentes tamaños de partícula.

La curva anterior representa la liberación de agua. En la succión de 10 cm de columna de agua, la planta extrae fácilmente el agua retenida en los poros grandes. A medida que las succiones se incrementan la planta necesitará más energía, hasta que ya no

pueda continuar extrayendo el agua de los poros más pequeños (menores de 0.0002 mm de diámetro), alcanzando el punto de marchitez permanente (Ansorena, 1994).

5.2 Turba o Peat Moss

Es un nombre genérico que se aplica a diversos materiales que proceden de plantas parcialmente descompuestas, dependiendo de la naturaleza, del origen botánico y de las condiciones climáticas predominantes durante su formación; el régimen hídrico y el flujo de agua son los que regulan el tipo de vegetación y por lo tanto la calidad de material formado. Generalmente, se acumulan bajo el agua, en áreas con temperaturas y niveles de oxígeno bajos (Peck, 1984). El peat moss o las turbas pueden estar compuestas de varias especies de plantas, incluyendo musgos, juncos y pastos. La especie de planta, su grado de descomposición, la variación entre climas locales y la calidad del agua, contribuyen a tener diferencias en la calidad de los materiales y determinar su valor como un componente del medio de crecimiento (Mastalerz, 1977).

El peat moss de musgo de *Sphagnum* está compuesto por más de 75% de musgos de este género. Hay aproximadamente 335 especies de este musgo en el mundo (Puustjarvi, 1974). Hellum (1975), reportó que tan solo en Alberta (Canadá) hay 25 especies; los tallos y las hojas presentes son característicos y la estructura fibrosa unicelular es típica. Las hojas del musgo *Sphagnum* contienen un gran número de poros que forman un sistema capilar interno, capaz de almacenar grandes cantidades de agua disponible (Peck, 1984) y se estima que ésta se almacena en los espacios porosos internos. Además de sus características físicas, pueden ser identificados a partir de su origen geográfico. El musgo *Sphagnum* crece en climas fríos del norte; Hellum (1975) estableció que los pantanos con *Sphagnum* útil se encuentran en latitudes de 45 y 65°, que incluyen la parte norte de la zona templada, zona boreal y la parte sur de la tundra ártica. El peat moss de los pantanos del sur de Alberta, Canadá, contienen baja proporción de musgo *Sphagnum*, a causa de la alcalinidad del suelo y agua en esa región. Existe una variación considerable en la calidad de los productos de musgo, aún dentro del tipo colectado de los pantanos con *Sphagnum*. Carlson (1983), estableció que la calidad varía no solamente entre pantanos, si no también dentro del mismo, por lo que los resultados son variables.

El estudio del peat moss es importante, ya que después del suelo, es uno de los sustratos más utilizados en la horticultura, debido a que poseen una alta capacidad de retención de humedad (de 6 a 15 veces su peso).

5.2.1 Análisis micromorfológico

5.2.1.1 Porosidad

a. Tipo de poros

El peat moss presentó poros de empaquetamiento compuesto, equidimensionales a alargados en todos los tamaños de partícula (Cuadro 7). Esta propiedad hace que los poros sean permanentes y continuos (Lagger y Pape, 1995). La conductividad del agua en el sustrato depende de la geometría de los poros y las propiedades del fluido de este. En condiciones de saturación, el movimiento del agua es predominantemente en los grandes poros, disminuyendo el contenido del agua (drenan fácilmente) e incrementando la circulación del aire, por lo que el movimiento del agua se presenta principalmente en los poros pequeños (Fonteno, 1993).

Cuadro 7. Propiedades micromorfológicas en diferentes tamaños de partícula en peat moss.

Descripción		Tamaño de partícula (mm)					
		<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Orden (%)	<i>Inter partícula</i>	74.4	86.2	77	68	42.2	57.8
	<i>Intra partícula</i>	25.6	13.8	23	32	57.8	43.2
Poros (%)	<i>P. E. Simple¹</i>						
	<i>P. E. Compuesto</i>	100	100	100	99.5	100	98.8
	<i>P. E. Complejo</i>						
	<i>Vesícula</i>				0.5		1.2
	<i>Fisuras</i>						
Forma (%)	<i>Vesícula</i>				0.5		1.2
	<i>Tubular/Capilar</i>						
	<i>Fibrosa</i>		1.2	5.4	2.8	5	15.4
	<i>Irregular</i>	100	98.8	94.6	95	95	83.4
	<i>Acicular</i>				1.7		
	<i>Laminar</i>						
	<i>Fisuras</i>						

¹P. E. = Poros de empaquetamiento.

b. Tamaño de poros

El peat moss tiene macroporos (0.01 a 1 mm) y mesoporos (0.05 a 0.01mm) entre las partículas (inter) y microporos (menores a 0.05 mm) dentro de las partículas (intra).

Burés (1997) mencionó que el peat moss de *Sphagnum* tiene una gran cantidad de fibras que retienen agua. Los tamaños de las células de las plantas varían entre 14 y 36 μm , éstas células o poros no son capaces de retener agua fácilmente disponible, por lo que el balance de agua (AFD) y aire se presenta principalmente en los poros inter particulares; sin embargo, sí contribuyen a la reserva del agua en el sustrato. Peck (1984) indicó que el peat moss se caracteriza por tener un sistema de transporte único constituido por células lignificadas que permanecen mecánicamente estables después de la muerte de la planta. Las paredes celulares del sistema de transporte son porosas (Figura 9a-c), permitiendo el movimiento vertical y horizontal del agua y de los solutos, incluso si la planta está muerta. Esta característica es la que proporciona la propiedad más apreciada del peat moss en la horticultura (gran capacidad de retención de agua).

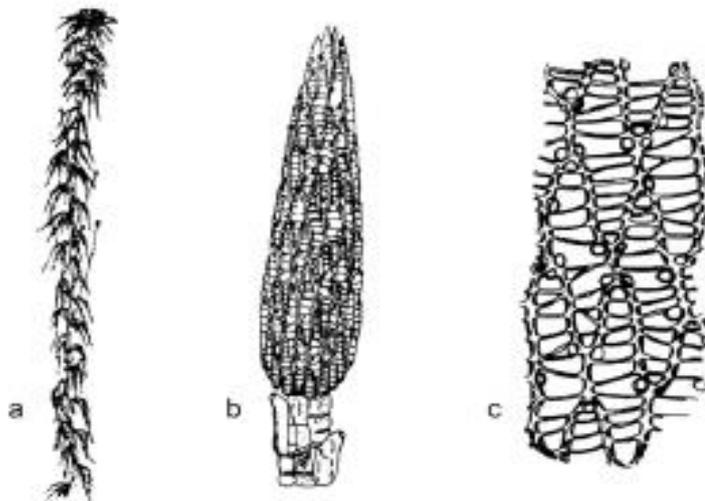


Figura 9. Peat moss de *Sphagnum*, identificado por su estructura porosa abierta de las células de sus hojas: a) planta, b) hoja y c) estructura interna de la hoja (modificado por Peck, 1984).

c. Ubicación de los poros (inter e intra)

El peat moss presentó el mayor porcentaje de poros inter partícula en partículas de 0.25 mm (86.2%) y menor porosidad intra partícula (13.8%) (Cuadro 7).

La Figura 10a-f muestra las secciones delgadas de peat moss en diferentes tamaños de partícula. Se puede observar que en partículas de 1 mm se presentaron algunos poros de tipo cavidad o mesoporos; estos poros le proporcionan al sustrato una menor disponibilidad de agua y una mayor capacidad para almacenarla, lo cual se puede atribuir al arreglo y forma de las partículas, que garantizan una mejor retención de humedad. También se puede apreciar que las partículas de 2 mm de diámetro al tener menor cantidad de poros inter partícula (42.2%) y una mayor cantidad de poros intra partícula (57.8%) (Cuadro 7), no permite tener agua fácilmente disponible (2.3%), por lo que sólo es agua de reserva (13.1%) y agua difícilmente disponible para la planta (47.9%).

En partículas de 0.25 mm de diámetro se presentó una mayor cantidad de poros inter partícula (86.2%) y una menor cantidad de poros intra partícula (13.8%), proporcionándole al material una mayor cantidad de agua fácilmente disponible (34.3%), una capacidad de aireación intermedia (33.6%) y una menor cantidad de agua difícilmente disponible (21.7%); ésta partícula presentó 98.8% de poros irregulares. En el caso de partículas de 1 mm con 68% de poros inter partícula y 32% de poros intra partícula se presentó la mayor capacidad de aireación (57.1%), mientras que mostró valores intermedios en agua fácilmente disponible (10.9%), agua de reserva (3.7%) y agua difícilmente disponible (22.6%). Las diferencias en comportamiento entre los dos tamaños pueden estar relacionadas con la cantidad de poros inter e intra partícula que presentaron, teniendo formas variadas en partículas de mayor tamaño (poros vesícula, fibrosos, aciculares e irregulares) (Figura 10 y 11 a-f).

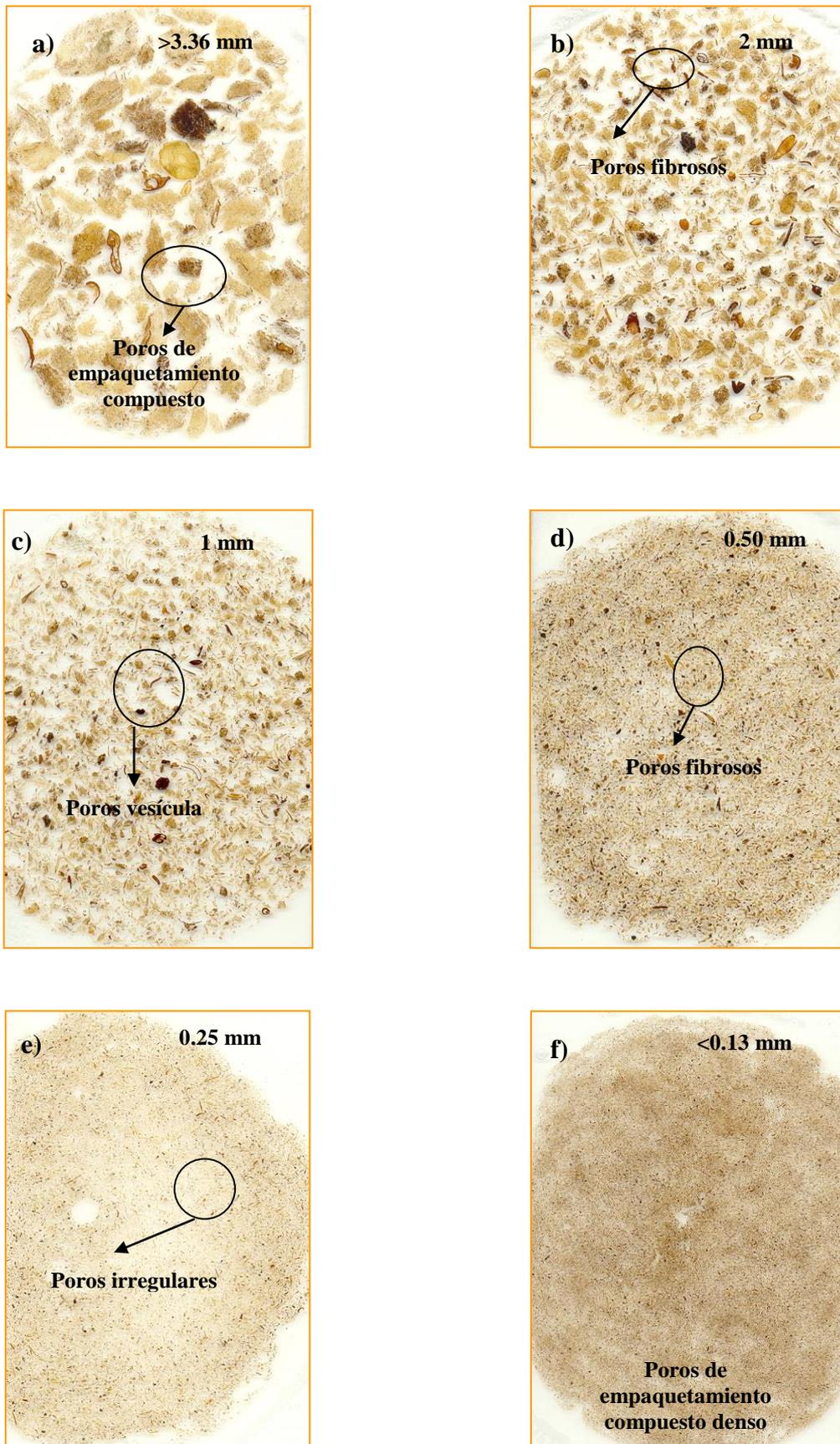


Figura 10. Secciones delgadas de peat moss en diferentes tamaños de partícula (dimensión de la sección delgada 5 x 7.5 cm).

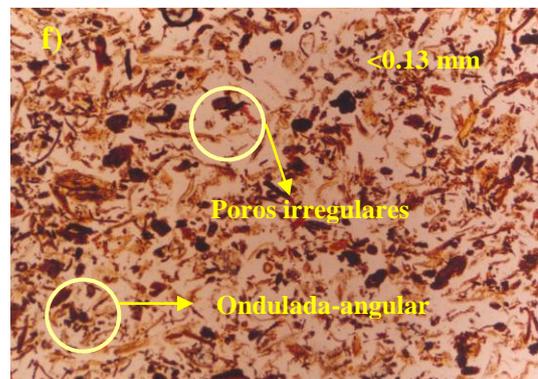
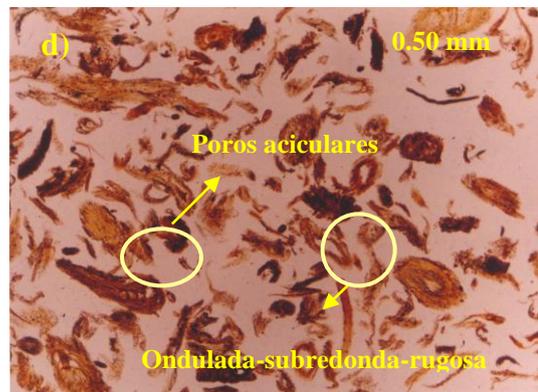
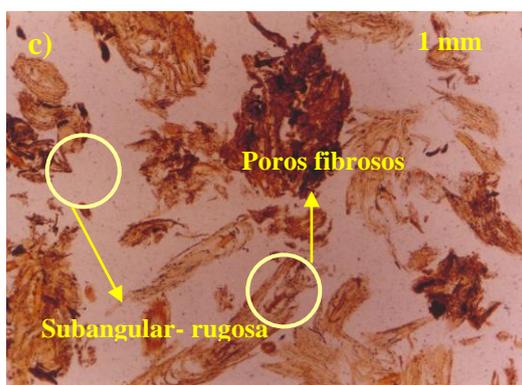
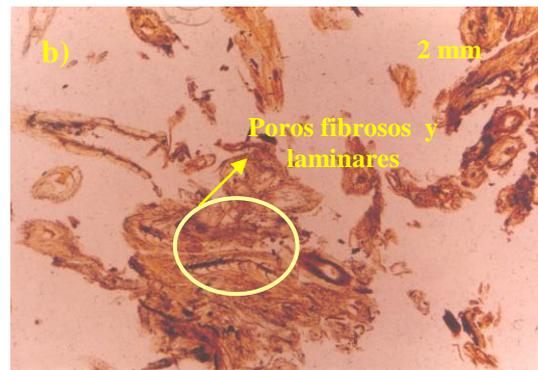
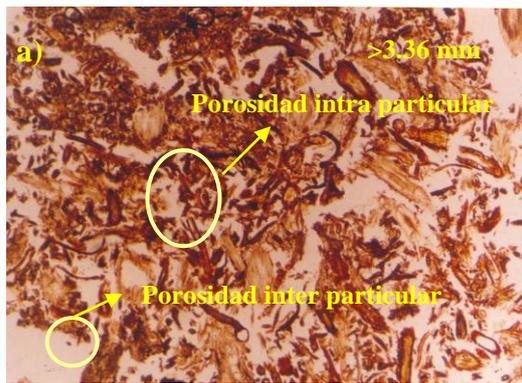


Figura 11. Peat moss: a) porosidad inter e intra partícula, b-f) forma de poros y tipos de partícula (longitud del marco 5.3 mm LPP).

Los sustratos orgánicos están formados por partículas y fibras de diversos tamaños, de las cuales cada una tiene poros internos diferentes, conformando la porosidad interna o intra partícula, dependiendo de la naturaleza del material (Burés *et al.*, 1993). Los poros que quedan entre las partículas originan la porosidad inter partícula teniendo un acomodamiento diferente. Cabe resaltar, que los poros de los sustratos orgánicos e inorgánicos (granos y fibras) generan poros internos que pueden estar conectados con el exterior y proporcionar una mayor porosidad.

Un sustrato debe contener macroporos para aireación y drenaje, y microporos para la retención de humedad. La proporción de macroporos con relación a los microporos, varía considerablemente entre diferentes materiales y las características de porosidad (Beardsell *et al.*, 1979).

d. Forma y frecuencia de los poros

La descripción de poros correspondió a empaquetamiento compuesto y la forma dominante fue de tipo irregular (>80%), fibroso (<16%) y poros que se encontraron conectados. También se observaron poros aciculares y vesiculares (<2%), los cuales no están conectados (Cuadro 7 y Figura 11 b-f).

5.2.1.2 Partículas

a. Forma

Las características de las partículas que se encontraron fueron cuatro: ondulada-subredonda-rugosa; subangular-rugosa; alargada-angular-rugosa y ondulada-angular.

La forma de las partículas también afecta la porosidad del sustrato al igual que la fibra de coco. Algunos materiales pueden ser compactados como el peat moss y la vermiculita, mientras que otros, como la perlita y la corteza de pino, mantienen su tamaño original aún bajo presión. El peat moss es muy frágil y puede ser fraccionado fácilmente en partículas más pequeñas, durante el mezclado y el manejo (Milks *et al.*, 1989).

Las partículas de los componentes de los sustratos no son completamente sólidas, y contienen espacios internos vacíos; esta porosidad interna es importante para las propiedades físicas de los materiales. Algunos materiales densos, como las partículas de arena, esencialmente carecen de porosidad interna, mientras que otros materiales, poseen

una gran porosidad (cortezas). Por ejemplo, el espacio poroso interno de las partículas de corteza de pino fue determinado como superior a 43% de su volumen total (Pokorny, 1987).

Además de afectar la densidad, la porosidad interna puede influenciar las propiedades de retención de humedad y nutrientes de un medio de crecimiento, aunque el almacenamiento interno del agua es considerado por algunos investigadores como no disponible para la planta (Spomer, 1975). Pokorny (1987) demostró que la absorción de agua por la planta se incrementa por la penetración de las raíces en las partículas de corteza de pino. La estructura esponjosa del peat moss de musgo del género *Sphagnum*, y de las partículas de vermiculita, reflejan una elevada porosidad interna, la cual es una de las razones de la demanda de éstos productos.

b. Distancia entre partículas

La distancia entre partículas de peat moss fue variable; es decir, no hay un comportamiento lineal entre tamaño de partículas y la distancia entre ellas. Sin embargo, se puede mencionar que predominaron distancias entre 0 a 500 μm en todos los tamaños. Cabe señalar, que las partículas menores que 0.13 mm, fueron las que presentaron mayor compactación (0-100 μm). Las demás fracciones conservaron una mayor distancia entre 50 y 1000 μm (Cuadro 8). La distancia entre las partículas es trascendente, ya que los poros que contienen agua son relativamente pequeños y son denominados microporos; mientras que los que contienen el aire son los macroporos.

Cuadro 8. Porcentaje de ocurrencia del diámetro de poros en peat moss.

Tamaño de partícula (mm)	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Diámetro de poro (μm)	Ocurrencia (%)					
0-50	43.3	36.6	33.3	23.3	13.3	6.7
50-100	53.4	40	26.7	16.7	23.3	33.4
100-200	3.3	16.7	23.3	43.4	26.7	13.3
200-300		6.7	16.7	13.3	23.4	30
300-500				3.3	10	13.3
500-700					3.3	
700-1000						3.3
> 1000						

5.2.2 Propiedades físicas

a. Tamaño de las partículas

Los resultados del tamaño de partícula de la muestra de peat moss analizada se muestran en el histograma de frecuencias (Figura 12); se observa una mayor dominancia de partículas menores de 0.13 y mayores de 3.36 mm (27.1 y 43.9% en peso, respectivamente).

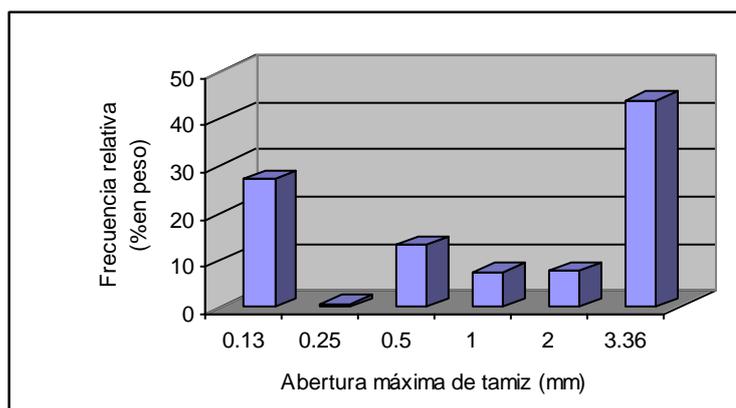


Figura 12. Histograma de frecuencias para la distribución granulométrica en peat moss.

El tamaño de partícula es un factor importante en la determinación de las relaciones agua y aire (Verdonck, 2004). Burés (1997) realizó un histograma de peat moss de Galicia, Rusia y reportó las mayores frecuencias (% en peso) en partículas menores de 4 mm, en ambos materiales (95 y 48.5%, respectivamente). Además encontró que el 5% restante del peat moss de Rusia estuvo distribuido entre partículas de 4 y 32 mm de diámetro, mientras que el 51.5% del peat moss de Galicia se presentó entre partículas de 4 y 16 mm, teniendo variaciones dependiendo del origen del material.

Verdonck (2004) seleccionó al azar tres materiales diferentes de peat moss, los tamizo (no menciona el origen) y obtuvo fracciones en los siguientes intervalos: de 0-1; 1-2; 2-3; 3-5 y 5-8 mm; reportó valores de tamaño de partícula para el peat moss tipo 1, de 44.2%, 19.6%, 4%, 17.6% y 14.6%; para el tipo 2 de 50.9%, 19.6%, 3.3%, 15.6%, 11% y finalmente, para el tipo 3 de 55.2%, 14.8%, 3%, 13.4% y 13.6%, respectivamente.

Estos valores no siempre concuerdan con los obtenidos en la presente investigación, ya que los mayores porcentajes se encontraron en partículas menores entre

0.13 y 5 mm. Es importante señalar, que las partículas grandes no se acoplan entre sí como las partículas pequeñas, debido a la diversidad de formas de éstas y por ello producen una mayor porosidad. La porosidad de aireación y la porosidad de retención de humedad tienen una relación complementaria, es decir, conforme el tamaño de las partículas incrementa, la porosidad de retención de humedad disminuye y la porosidad de aireación aumenta. Sin embargo, esto no siempre se cumple (Verdonck, 2004).

Puustjarvi y Robertson (1975) mencionaron que para el peat moss, es recomendable un tamaño de partícula entre 0.8 mm y 6 mm; ya que si las partículas son menores (0.8 mm), los microporos predominarán, y el medio de crecimiento fácilmente podrá saturarse con agua, teniendo problemas de aireación. El orden de optimización de los sustratos presenta una mezcla de diversas fracciones en el mismo material o uso de varias fracciones en diferentes materiales (mezclas) (Verdonck, 2004).

Las grandes diferencias en las fracciones de las partículas dependen de la técnica de extracción utilizada en el pantano, la cosecha y la técnica de tamizado. La extracción puede ser de varios tipos: cortado, molido y minado hidráulico. Por ejemplo, para peat moss, los bloques son cortados en trozos, para su fragmentación posterior hasta obtener una textura apropiada, éste tipo de extracción es comunmente preferida para los sustratos en contenedor por su textura gruesa. En el caso del minado hidráulico se troza mecánicamente el peat moss y luego se limpia del líquido del pantano; este proceso de extracción produce rompimiento de la estructura de las partículas, ocasionando que se compacte en mayor medida, con la consecuente pérdida en la porosidad total y en aireación (Hellum, 1975). El método de extracción del peat moss también puede afectar las características físicas, especialmente su porosidad (Wilson, 1985).

Desde el punto de vista físico, el peat moss es un material poco homogéneo, puesto que presenta descomposición variable (pequeñas ramas, troncos, fibras, gránulos, etc.), generando diversos tamaños de partículas; no obstante, presentan como principal problema, la determinación de la granulometría, puesto que las fibras atraviesan los tamices longitudinalmente. Las fibras y agregados se fraccionan mediante la vibración que se tiene durante el tamizado, a medida que la turba se descompone aumenta el contenido de sustancias coloidales originando peat moss amorfo, que en función a su manejo se puede transformar en agregados granulares (Burés, 1997).

b. Densidad aparente (DA)

Los valores de DA son variables, ya que el grado de compresión y el arreglo de las partículas se ven afectados, dependiendo del tamaño de éstas. El análisis estadístico mostró diferencias significativas, la mayor DA se encontró en partículas menores de 0.13 mm (0.15 g cm^{-3}) (Cuadro 9). Los resultados concuerdan con los obtenidos por Verdonck *et al.* (1983), quienes reportaron valores de DA de 0.107 g cm^{-3} para peat moss negro y de 0.077 g cm^{-3} para peat moss claro y difieren con Burés (1997) en el peat moss de Galicia (0.26 g cm^{-3}) y Rusia (0.09 g cm^{-3}). Esto significa que se debe tener cuidado con esta propiedad cuando se utiliza en sustratos, ya que puede variar de acuerdo con su origen, tipo y las condiciones experimentales (heterogeneidad de partículas y humedad).

La DA fue muy semejante a la de la fibra de coco, en ambos materiales en partículas menores de 0.13 mm se encontró una mayor densidad. la diferencia en los otros tamaños de partículas radica en tipo, forma y acomodamiento de partículas.

Cuadro 9. Densidad aparente y real en diferentes tamaños de partícula en peat moss.

Densidad (g cm^{-3})	Tamaño de partícula (mm)					
	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Aparente	0.15 a ¹	0.09 b	0.08 b	0.08 b	0.09 b	0.1 b
Real	1.38 a	1.24 b	1.35 a	1.37 a	1.36 a	1.32 a

¹Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes dentro de cada hilera (Tukey, $p < 0.05$).

c. Densidad real (DR)

Los resultados de DR fueron variables y estadísticamente significativos dependiendo del tamaño de partícula (Cuadro 9); se encontró una mayor densidad en partículas menores de 0.13 mm (1.38 g cm^{-3}) y la menor en partículas de 0.25 mm (1.24 g cm^{-3}). Al realizar una comparación con los análisis micromorfológicos, se encontró que este comportamiento irregular puede estar relacionado con el empaquetamiento más denso de ésta partícula.

Burés (1997) mencionó que la densidad real es variable dependiendo del origen de los materiales y reportó valores de 1.56 g cm^{-3} y 1.62 g cm^{-3} para peat moss de Galicia y Rusia, respectivamente. Sin embargo, estos valores son diferentes al obtenido en esta investigación, lo cual se puede atribuir al tipo y origen del material utilizado.

La DA y la DR con valores bajos no proporcionan estabilidad en la maceta para el manejo en campo. Maronek *et al.* (1986) mencionó que el peso es trascendente para la manipulación en invernaderos.

d. Espacio poroso total (EPT):

Los resultados de EPT son variables (de 89.13 hasta 94.16%). La mayor porosidad se presentó en partículas de 1 mm con 94.16% (Cuadro 10). Estos resultados mostraron significancia; es decir, que el espacio poroso total se ve influido por el tamaño de partícula.

Cuadro 10. Porosidad y retención de agua en diferentes tamaños de partícula en peat moss.

Porosidad y retención de agua (% volumen)	Tamaño de partícula (mm)					
	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
EPT ²	89.13 b ¹	92.74 a	94.07 a	94.16 a	93.38 a	92.42 a
CA	33.9 d	33.6 d	54.2 b	57.1 a	30.1 e	36.7 c
AFD	25.5 a	34.3 a	15.3 c	10.9 d	2.3 f	10.1 e
AR	7.8 b	3.2 dc	3.0 d	3.7 c	13.1 a	0.2 e
ADD	22.0 dc	21.7 dc	21.5 d	22.6 c	47.9 a	45.4 b
MS	10.87 a	7.26 b	5.93 b	5.84 b	6.62 b	7.58 b

¹Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes dentro de cada columna (Tukey, p<0.05).

²EPT = Espacio poroso total, CA = Capacidad de aireación, AFD = Agua fácilmente disponible, AR = Agua de reserva, ADD = Agua difícilmente disponible y MS = Material sólido.

Los sustratos orgánicos están formados por partículas y fibras de diversos tamaños, de las cuales cada una tiene poros internos diferentes, conformando la porosidad interna o intra agregado, lo cual dependerá de la naturaleza del material (Burés *et al.* 1993). Los poros que quedan entre las partículas originan la porosidad inter agregado teniendo un acomodamiento diferente. Es importante mencionar, que los poros de los sustratos orgánicos e inorgánicos (granos y fibras), generan poros internos que pueden estar conectados con el exterior y proporcionar una mayor porosidad. El peat moss tiene una alta porosidad y retención de humedad, porque posee un gran espacio poroso interno.

Un sustrato está compuesto de partículas sólidas y de espacios porosos que existen entre ellas; estos espacios porosos son tan importantes como las mismas partículas. Landis *et al.* (1990) y Fonteno (1993) indicaron que el sustrato debe ser lo suficientemente poroso

para facilitar un eficiente intercambio de oxígeno y bióxido de carbono; señalaron además que este intercambio gaseoso debe tener lugar en los grandes poros llenos de aire del medio de crecimiento, los cuales están directamente relacionados con el tamaño, forma y distribución de las partículas. No obstante, estos autores no realizaron análisis morfológicos para la demostración anterior.

El peat moss negro tiene un menor espacio poroso total (91.9%) que el de color claro (94.6%) (Verdonck *et al.*, 1983). Martínez *et al.* (1997) seleccionaron tres materiales de peat moss y encontraron valores variables (92.1%, 92.5% y 95.1% de espacio poroso total), sin mencionar el origen de los materiales y el tamaño de partícula usado, a pesar de que el tamaño de partícula es un factor importante para proporcionar un espacio poroso. Prasad (1993) realizó trabajos con diversos tamaños de partícula para peat moss de *Sphagnum* y reportó que la porosidad total es diferente dependiendo del tamaño de partícula; por ejemplo, para partículas de 0-13 mm, el espacio poroso total fue de 94.4%; en partículas de 6-12 mm fue de 92% y finalmente para partículas de 10-25 mm, 91.5%. Finalmente, Burés (1997) mencionó una porosidad total de 95%, no obstante, después reportó diferentes valores para peat moss de diversos orígenes (83.33% para Galicia y 94.44% para Rusia).

Handreck y Black (1984) reportaron que un sustrato bien formulado contiene alrededor de 60-80% de porosidad total. En tanto que Havis y Hamilton (1976) establecieron que la porosidad total de un sustrato debe exceder el 50%, y que la porosidad de aireación debería ser entre 20 y 25%. Por su parte, Puustjarvi y Robertson (1975) recomendaron un valor aún mayor de porosidad de aireación, entre 45 y 50% debido a la gran demanda de oxígeno de las raíces en los ambientes de los invernaderos. Esto significa, que existe una amplia variación en las recomendaciones de porosidad (características físicas de los sustratos), información que se debe de tomar con cierta cautela, siendo recomendable la caracterización de los materiales.

e. Retención de agua

Los resultados mostraron un comportamiento diferente en cuanto a la retención de agua dependiendo del tamaño de partícula (Cuadro 10). Sin embargo, si se analiza cada una de ellas en cuanto a su porosidad (poros inter e intra agregado) y se relacionan con la retención de agua, entonces se puede explicar su comportamiento.

Se observó que la CA es mayor en partículas de 1 mm (57.1%), y menor en las de 2 mm (30.1%). De acuerdo con la literatura, se esperaba que en partículas mayores de 3.36 mm se presentaran los mayores valores; sin embargo no fue así (36.7%). Estas partículas presentaron el más alto porcentaje de poros intra-agregados (57.8%) o micro agregados que están actuando como almacenes de agua, por lo que reducen drásticamente la capacidad de drenaje. En el caso de las partículas de 1 mm, el porcentaje de poros intra agregado se redujó drásticamente (32%) y se incrementaron los poros inter agregado (68%); poros que sí tienen una función percolante. En cuanto a las partículas de 2 mm, la baja capacidad de aire se debe al alto porcentaje de poros intra agregado (57.8%) y al tamaño de partícula que incrementa la superficie específica.

La mayor cantidad de AFD se encontró en partículas de 0.25 mm (34.3%) y la menor cantidad en partículas de 2 mm (2.3%); en partículas de mayores de 3.36 mm se encontró 10.1% de AFD. Al comparar el tipo de poros con el tamaño de partículas se encontró que las partículas de 0.25 mm presentaron menor porosidad interna (13%), mientras que las mayores de 3.36 mm tuvieron hasta 43.2%.

Este comportamiento debe de estar relacionado con las fuerzas de adhesión y cohesión. Las fuerzas de adhesión, se definen como la atracción molecular ejercida entre las superficies de dos cuerpos distintos puestos en contacto y las de cohesión, como la atracción recíproca entre moléculas de una misma especie que están inversamente relacionadas con la distancia (Baber y Gardner, 1973). Brady y Weil (1999) señalaron que entre menor sea el tamaño de partícula mayor será la retención de humedad debido a que se incrementan las fuerzas de adhesión. Esta información es válida siempre y cuando se analicen en partículas sólidas (sin poros internos), pues las fuerzas de adhesión se incrementan drásticamente cuando hay mayor superficie de contacto (agua-sólido) como el peat moss (con abundantes poros internos) (Figura 13).

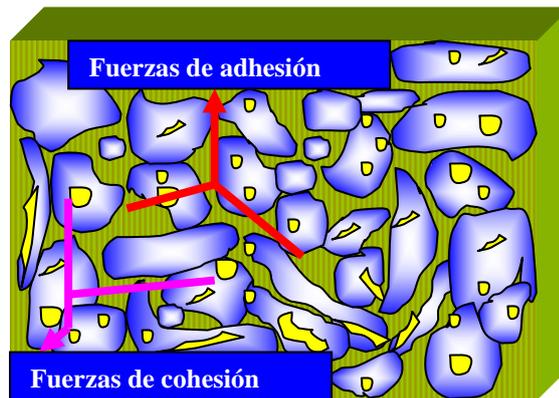


Figura 13. Diagrama que representa las fuerzas de cohesión y adhesión.

El efecto de la adhesión es mantener unidas a las partículas, por lo que estas fuerzas dependen de la proporción agua/aire. Las fuerzas de adhesión en partículas de 0.25 mm, sólo ocurre en la superficie externa (con porosidad inter partícula de 86.2%), de ahí que el agua sea fácilmente disponible. En contraste, Mollitor *et al.* (2004) señalaron que el fenómeno de la retención de agua está relacionado con la capilaridad y el peat moss presenta poros capilares a nivel celular, los cuales pueden estar llenos de agua.

Verdonck *et al.* (1983) indicaron que los materiales tienen diferentes propiedades especialmente la capacidad de aireación y la cantidad de agua fácilmente disponible. El alto contenido de aire y la disponibilidad del agua para los diferentes tamaños de partícula, son un factor determinante e hipotetizaron que el tamaño de partícula puede ser una respuesta a este comportamiento. Prasad (1993) mencionó que las partículas entre 0-3 mm presentan un alto contenido de aire, y explicó que se atribuye a que las partículas individuales de peat moss de *Sphagnum* pueden mantener su estructura durante las operaciones de extracción (cosecha); reportando valores para CA de 13.7%, AFD 37.3% y AR 5%; mientras que en partículas de 6-12 mm la CA fue de 36.3%, AFD 17.8% y AR 3.4%, mostrando variaciones dependiendo del tamaño de partícula.

Verdonck (2004) reportó variaciones en diferentes tamaños de partícula en cuanto a CA y AFD; en tamaños de 0-1 mm obtuvo 6.9% de CA y 35.5% de AFD; en tamaños de 1-2 mm, los valores fueron 37.5% de CA y 27.4% de AFD y finalmente, el tamaño de 3-5 mm con 50.4% de CA y 13.1% de AFD. También dentro de los mismos materiales se pueden presentar diferencias. Martínez *et al.* (1997) trabajaron con tres diferentes tipos de

peat moss y reportaron valores de CA de 27.6, 11.6 y 24.4% y AFD de 28.7, 38.9 y 35.3%, sin señalar el origen de los materiales y el tamaño de partícula usado.

Cabe señalar, que las propiedades del peat moss *Sphagnum* están asociadas con el grado de descomposición del material. Al respecto, Bunt (1988) y Handreck *et al.* (1991) señalaron que la textura y estructura del peat moss de *Sphagnum* son características que varían dependiendo de la calidad del embalaje, estación, método de cosecha, factores durante el procesamiento e incluso el contenedor y lugar de almacenamiento.

La retención de humedad con las variables de CA, AFD, AR, ADD y MS, solo mostraron significancia el AFD ($r^2 = 0.8436$) y ADD ($r^2 = 0.8262$) (Figura 14); estando altamente relacionadas con el tamaño de partícula y los tipos de poros (inter e intra partícula). El modelo de regresión muestra que el AFD disminuye a medida que aumenta el tamaño de partícula, mientras sucede lo contrario con el ADD.

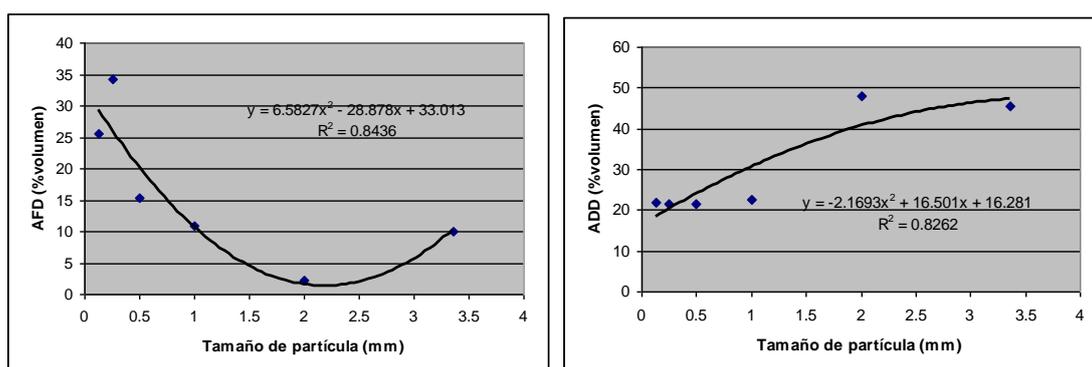


Figura 14. Relación entre agua fácilmente y difícilmente disponible y tamaño de partícula en peat moss.

f. Curva de liberación de agua

La Figura 15 muestra la curva de liberación de agua en peat moss y se observó como el tamaño de partícula está influyendo en dicha variable.

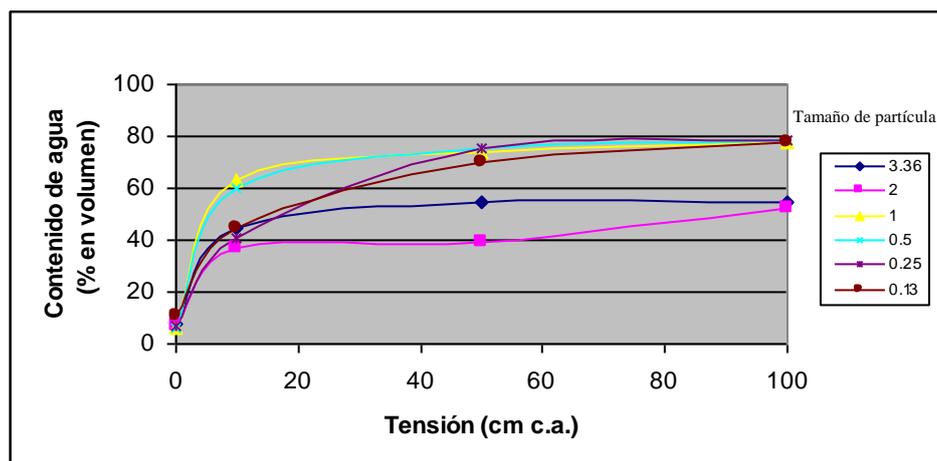


Figura 15. Curva de liberación de agua para peat moss en diferentes tamaños de partícula.

Verdonck (2004) concluyó que al analizar los diversos tamaños de partículas se presentaron diferencias en las propiedades físicas, de tamaños semejantes y diversos orígenes (peat moss), y mencionó que las partículas con alto contenido de aireación presentan un ligero incremento en el contenido de agua y que la composición del sustrato depende de la técnica del cultivo, el tipo de planta y otros factores. Sin embargo, es importante estandarizar los diversos materiales y partículas a utilizar.

5.3 Composta

Es un producto derivado de la evolución de un proceso de composteo; es decir, son los residuos orgánicos, que han pasado por una descomposición rápida hasta el proceso de humificación (Bertoldi *et al.*, 1985). El compostaje es un proceso biooxidativo de residuos orgánicos bajo condiciones controladas de temperatura, humedad y aireación, en el cual participan diferentes grupos microbianos dependiendo de la etapa y del proceso de descomposición de residuos sólidos orgánicos en materiales relativamente estables semejantes al humus (Hoitink y Kuter, 1986; Zucconi y Bertoldi, 1987; Xian-Tao *et al.*, 1992).

La composta utilizada para este estudio fue un producto obtenido después de la descomposición de los residuos orgánicos (estiércoles de cabra y borrego, aserrín, podas de jardín, basura de comida y sustrato agotado de setas) mediante el control de las condiciones ambientales.

5.3.1 Análisis micromorfológico

5.3.1.1 Porosidad

a) Tipos de poros

La composta presentó poros de empaquetamiento compuesto y complejo de equidimensionales a alargados, ésta propiedad es lo que hace que los poros sean permanentes y continuos; también se observaron poros vesiculares permanentes y discontinuos (Figura 16 a-f).

b) Tamaño de poros

La composta presentó macroporos y mesoporos entre las partículas y microporos dentro de las mismas. También se encontraron algunos minerales.

c) Ubicación de los poros (inter e intra)

Los resultados de la composta en partículas de 0.13 mm de diámetro presentaron una mayor cantidad de poros inter partícula (82%) y una menor cantidad de poros intra partícula (18%), proporcionándole al material mayor cantidad de agua fácilmente disponible (12.8%) y agua de reserva (6.1%); una capacidad de aireación intermedia (11.5%) y valores menores de agua difícilmente disponible (24.4%); ésta partícula presentó 100% de poros irregulares (Cuadro 11).

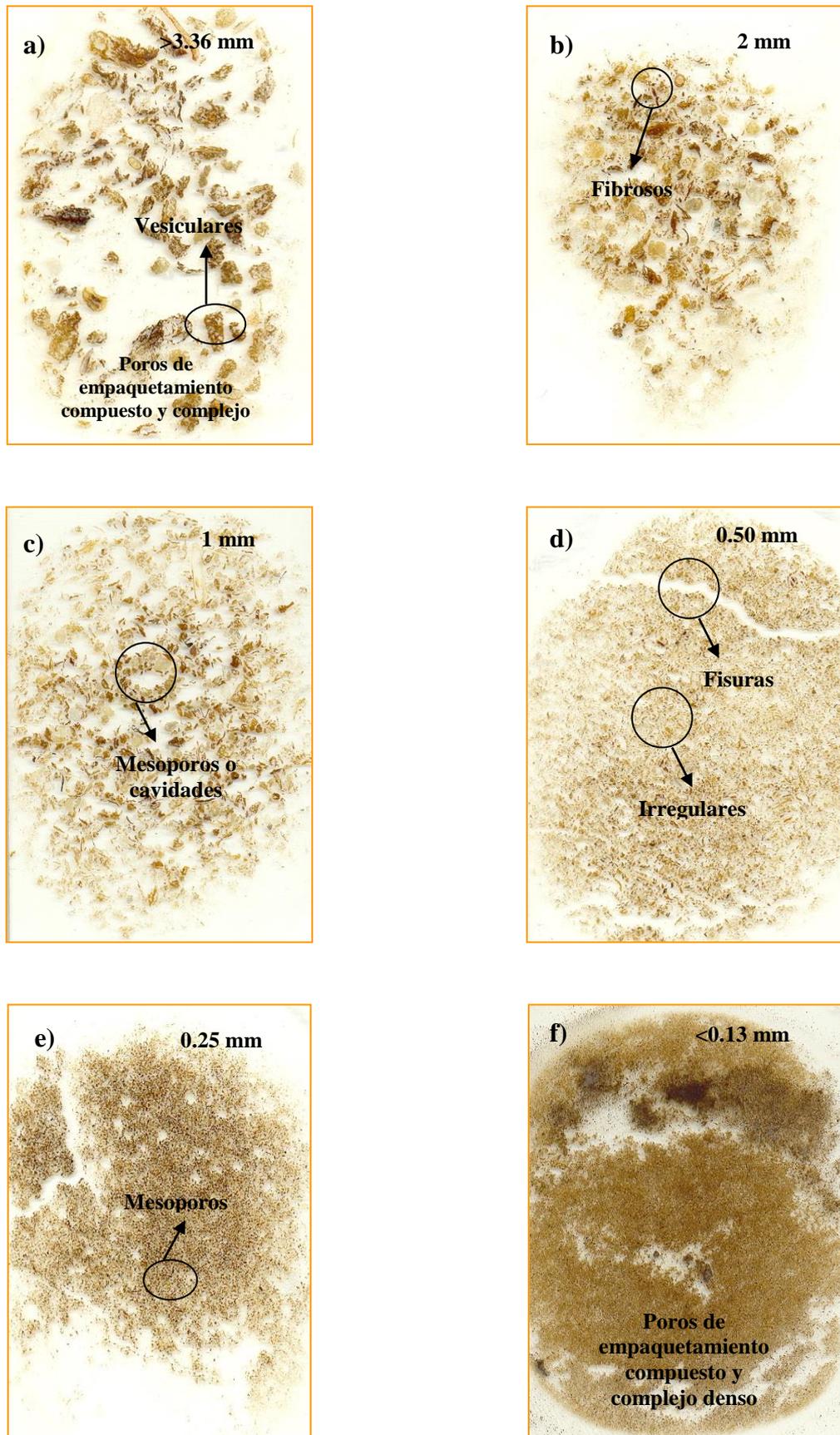


Figura 16. Secciones delgadas de composta en diferentes tamaños de partícula (dimensión de la sección delgada 5 x 7.5 cm).

En el caso de partículas de 2 mm con 38% de poros inter partícula y 62% de poros intra partícula se acercó al mayor valor de capacidad de aireación (21.3%) y agua difícilmente disponible (50%), reportándose los menores valores de agua fácilmente disponible (0.5%) y agua de reserva (0.1%) (Cuadro 11). Esto se atribuye a la cantidad de poros inter e intra partícula (Figura 16a) y a las diversas formas predominando los de tipo irregular (mayor al 89%) y observándose en menor cantidad los vesiculares y fibrosos (menor al 10%).

Cuadro 11. Propiedades micromorfológicas en diferentes tamaños de partícula en composta.

Descripción		Tamaño de partícula (mm)					
		<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Orden (%)	<i>Inter partícula</i>	82	81	79	68.5	38	59
	<i>Intra partícula</i>	18	19	21	31.5	62	41
Poros (%)	<i>P. E. Simple¹</i>						
	<i>P. E. Compuesto</i>	100	95	85	77.2	95	84
	<i>P. E. Complejo</i>		5	11	12.8	5	10
	<i>Vesícula</i>			4	10		6
	<i>Fisuras</i>						
Forma (%)	<i>Vesícula</i>			4	10		6
	<i>Tubular/Capilar</i>						
	<i>Fibrosa</i>			2		8	5
	<i>Irregular</i>	100	100	94	90	92	89
	<i>Acicular</i>						
	<i>Laminar</i>						
	<i>Fisuras</i>						

¹P. E. = Poros de empaquetamiento.

d) Forma y frecuencia de los poros

La descripción de poros correspondió a empaquetamiento compuesto (mayor de 77%) y empaquetamiento complejo, estos poros se encuentran conectados y en menor porcentaje se encontraron los poros vesiculares (menos de 10%), los cuales no se encuentran conectados (Cuadro 11). La forma de los poros en su mayor porcentaje fueron de tipo irregular (mayor de 89%), presentándose en menor cantidad poros de otras formas (fibrosa y vesiculares), influyendo en la disponibilidad de agua (Figura 17).

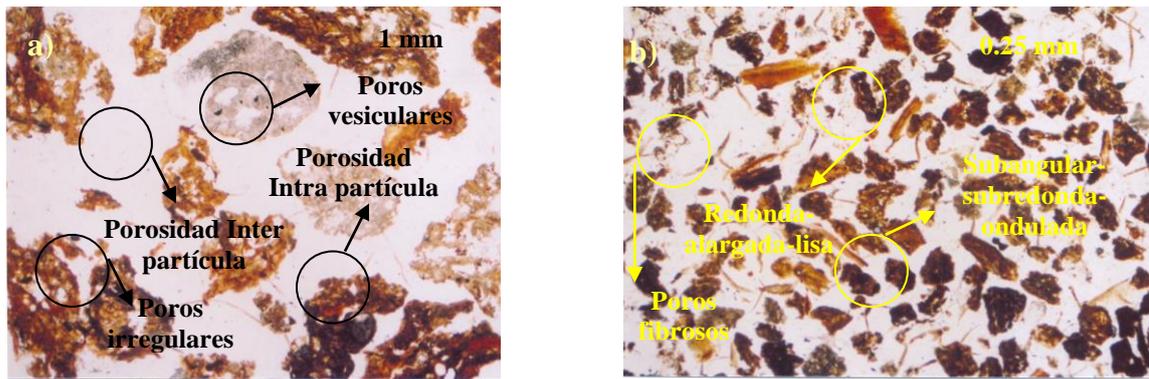


Figura 17. Composta: Porosidad inter e intra partícula y forma de poros (longitud del marco 5.3 mm LPP).

e) Diámetro de poros

La distancia de las partículas determina el tamaño de los poros, reportándose valores variables, dominando los diámetros de 0 a 500 μm (Cuadro 12). Es importante mencionar que la formación de mesoporos en tamaños de partículas menores de 1 mm predominando tamaños entre 100 y 200 μm (Figura 17), teniendo una influencia directa en la disponibilidad de agua.

Cuadro 12. Porcentaje de ocurrencia del diámetro de poros en composta.

Tamaño de partícula (mm)	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Diámetro de poro (μm)	Ocurrencia (%)					
0-50	76.7	46.7	33.3	33.3	16.7	3.3
50-100	23.3	40	36.7	20	16.7	10
100-200		13.3	26.7	46.7	33.3	40
200-300			3.3	3.3	6.6	10
300-500					26.7	23.3
500-700						
700-1000						6.7
> 1000						6.7

5.3.1.2 Partículas

a) Forma

La forma de las partículas de la composta es diversa de acuerdo con el tamaño y tipo de partículas. Las formas irregulares presentaron características subangular-subredonda-rugosa, subangular-subredonda-ondulada; las formas fibrosas fueron redonda-alargada- lisa; finalmente las formas vesiculares redonda-lisa (Figura 17).

5.3.2 Propiedades físicas

a) Tamaño de partículas

El tamaño de partícula de la composta se muestra en el histograma de frecuencias de la Figura 18 y se observó que hay una mayor dominancia de partículas mayores que 1 mm (81.5%).

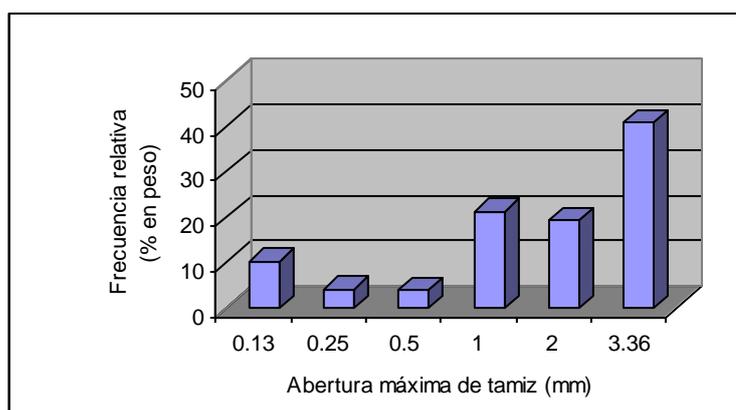


Figura 18. Histograma de frecuencias para la distribución granulométrica en composta.

b) Densidad aparente (DA)

Los resultados de DA son irregulares y estadísticamente diferentes, de 0.48 a 0.89 g cm⁻³) (Cuadro 13); presentándose una mayor densidad en partículas menores de 0.13 mm (0.89 g cm⁻³). En términos generales la densidad de la composta es más baja que las reportadas para suelos arcillosos y limosos de 0.9 a 1.25 g cm⁻³ (Brady y Weil, 1999), pero es la que se acerca más a las densidades reportadas para suelos.

Cuadro 13. Densidad aparente y real en diferentes tamaños de partícula en composta.

Densidad (g cm ⁻³)	Tamaño de partícula (mm)					
	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Aparente	0.89 a ¹	0.66 b	0.61 c	0.56 d	0.48 e	0.86 a
Real	1.97 a	1.82 ba	1.78 ba	1.81 ba	1.71 b	1.76 ba

¹Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes dentro de cada hilera (Tukey, $p < 0.05$).

c) Densidad real (DR)

Los valores de DR fueron estadísticamente significativos (Cuadro 13), presentándose el mayor valor en partículas menores que 0.13 mm (1.97 g cm⁻³), mientras que la menor se observó en partículas de 2 mm.

d) Espacio poroso total (EPT)

Los datos de EPT fueron estadísticamente significativos. Los valores mostraron un incremento hasta las partículas de 2 mm, y una disminución posterior. La mayor porosidad se observó en partículas de 2 mm con 71.93% (Cuadro 14) y la menor en tamaños mayores que 3.36 mm (51.14%). Este material presentó contenidos de materia orgánica que le proporcionan espacios porosos elevados debido a la formación de agregados granulares (Brady y Weil, 1999).

Cuadro 14. Porosidad y retención de agua en diferentes tamaños de partícula en composta.

Porosidad y retención de agua (% volumen)	Tamaño de partícula (mm)					
	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
EPT ²	54.82 c ¹	63.74 b	65.73 ba	69.06 ba	71.93 a	51.14 c
CA	11.5 c	28.2 a	25.0 a	22.0 b	21.3 b	6.0 d
AFD	12.8 a	11.4 a	11.2 a	10.1 a	0.5 b	1.2 b
AR	6.1 a	1.0 cb	2.1 b	0.1 c	0.1 c	0.7 cb
ADD	24.4 d	23.1 d	27.3 d	36.8 c	50.0 a	43.2 b
MS	45.18 a	36.26 b	34.27 cb	30.94 cb	28.07 c	48.86 a

¹Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes dentro de cada columna (Tukey, $p < 0.05$).

²EPT = Espacio poroso total, CA = Capacidad de aireación, AFD = Agua fácilmente disponible, AR = Agua de reserva, ADD = Agua difícilmente disponible y MS = Material sólido.

La porosidad total en composta presentó una r^2 de 0.9249 (Figura 19); se observó que a medida que aumentó la porosidad total lo hace también el tamaño de las partículas hasta 2 mm y disminuye al llegar a tamaños mayores que 3.36 mm.

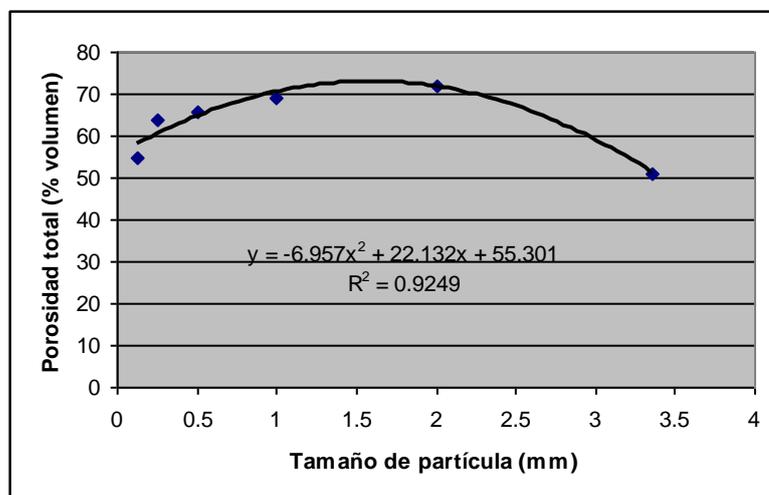


Figura 19. Relación entre porosidad total y tamaño de partícula en composta.

e) Retención de agua

El comportamiento para la retención de agua es diferente dependiendo del tamaño de las partículas. En el Cuadro 14 se aprecia que las partículas mayores de 3.36 mm (tamaño de grava) son las que presentaron la menor capacidad de aireación (6.0%), mientras que las partículas de 0.25 mm son las que mostraron el mayor valor (28.2%); al comparar estos resultados con el tipo y distancia de los poros, se observó que en estas últimas dominan los poros entre 0 y 200 μm (100%) y los poros inter partícula (81%), además de la formación de mesoporos predominante de 50 a 100 μm , éstas características le proporcionan una mejor percolación y disponibilidad de agua al presentarse un arreglo diferente entre las partículas. En las partículas mayores que 3.36 mm (59% de poros inter partícula y 41% intra partícula) se esperaría un incremento en la percolación; sin embargo, su capacidad de aireación reportada fue la menor (6.0%). Esto se puede atribuir a la porosidad inter e intra partícula que son las que retienen la humedad, almacenando agua difícilmente disponible (43.2%); mientras que en partículas mayores de 2 mm el mayor valor fue para ADD (50%) y los menores valores para AFD (0.5%) y AR (0.1%)

Para el caso de las partículas de 1 mm, el tamaño de poros fue entre 0 y 200 μm (96.7%) con 68.5% de poros inter partícula y 31.5% intra partícula, factores que impiden el drenaje del agua, teniendo valores intermedios de AFD (10.1%), AR (0.1%) y ADD (36.85%) y una capacidad de aireación de (22%). Finalmente, las partículas menores que 0.13 mm mostraron los mayores valores de AFD (12.8%) y AR (6.1%) (Cuadro 14). Es importante mencionar, que los materiales orgánicos que no son composteados adecuadamente, pueden perder volumen conforme se descomponen (Nelson, 1978).

El tamaño de partícula presentó una relación cuadrática entre las variables de AFD ($r^2=0.9018$), ADD ($r^2=0.9625$) (Figura 20), debido al acomodamiento de las partículas. Este modelo de regresión mostró que a medida que aumenta el tamaño de partícula disminuye la cantidad de AFD, mientras que en el caso del ADD sucede lo contrario.

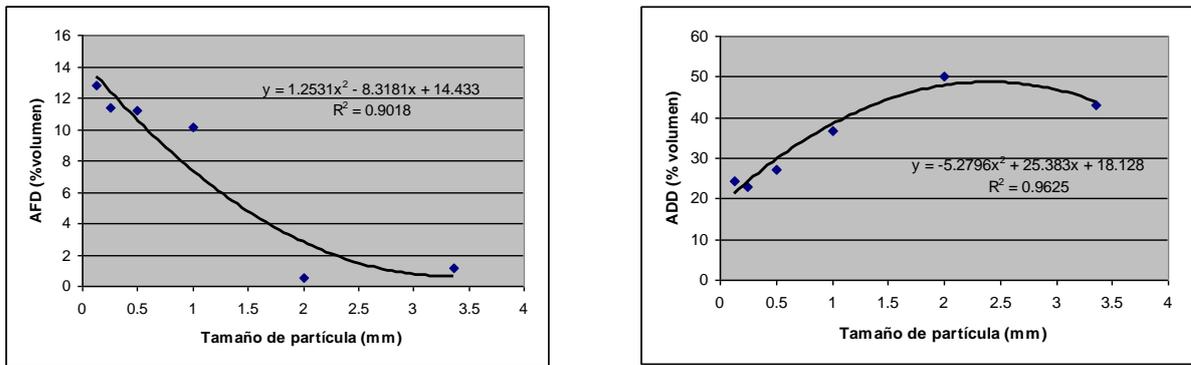


Figura 20. Relación entre el agua fácilmente y difícilmente disponible con el tamaño de partícula en composta.

f) Curva de liberación de agua

Los resultados de la curva de liberación de agua en composta se muestran en la Figura 21, en ésta figura se muestra que el tamaño de partícula está influyendo en la liberación de agua, los valores están relacionados con las tensiones (cm de c.a.) (De Boodt *et al.*, 1974).

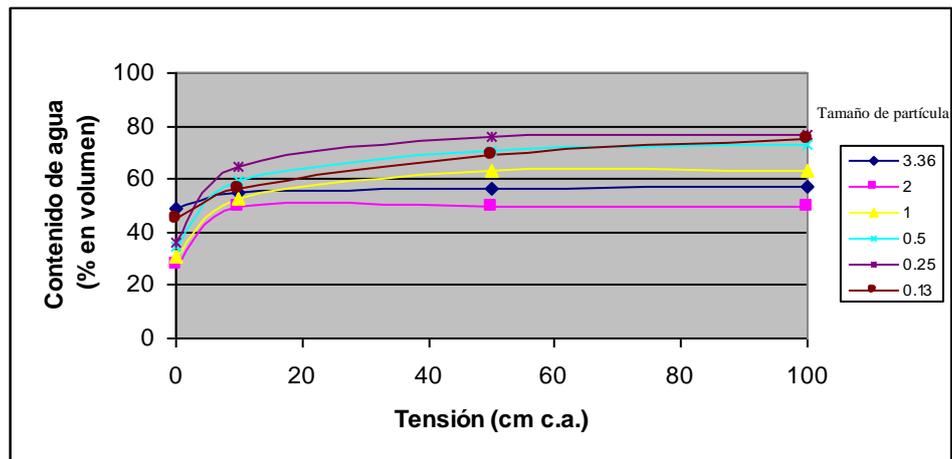


Figura 21. Curva de liberación de agua para composta en diferentes tamaños de partícula.

5. 4 Vermicomposta

La vermicomposta resulta de un proceso de compostaje semejante al de la composta sólo que en este caso se da por medio de lombrices, generalmente es inerte. La vermicomposta utilizada fue elaborada con residuos orgánicos (estiércoles de cabra, aserrín, podas de jardín, basura de comida, etc.) y está compuesta de partículas minerales con tamaño aproximado entre 0.05 y 0.2 mm.

5.4.1 Analisis micromorfológico

5.4.1.1 Porosidad

a) Tipos de poros

La vermicomposta presentó poros de empaquetamiento compuesto y complejo de equidimensionales a alargados; esta propiedad hace que los poros sean permanentes y continuos; también se observaron poros vesiculares permanentes y discontinuos (4%) y fibrosos (menor de 6%) (Figura 22 a-c).

De acuerdo con Bullock *et al.* (1985) los poros de empaquetamiento complejo se encuentran entre agregados simples (partículas grandes y pequeñas), son permanentes y continuos, presentan una alta permeabilidad y se combinan algunos minerales con la materia orgánica.

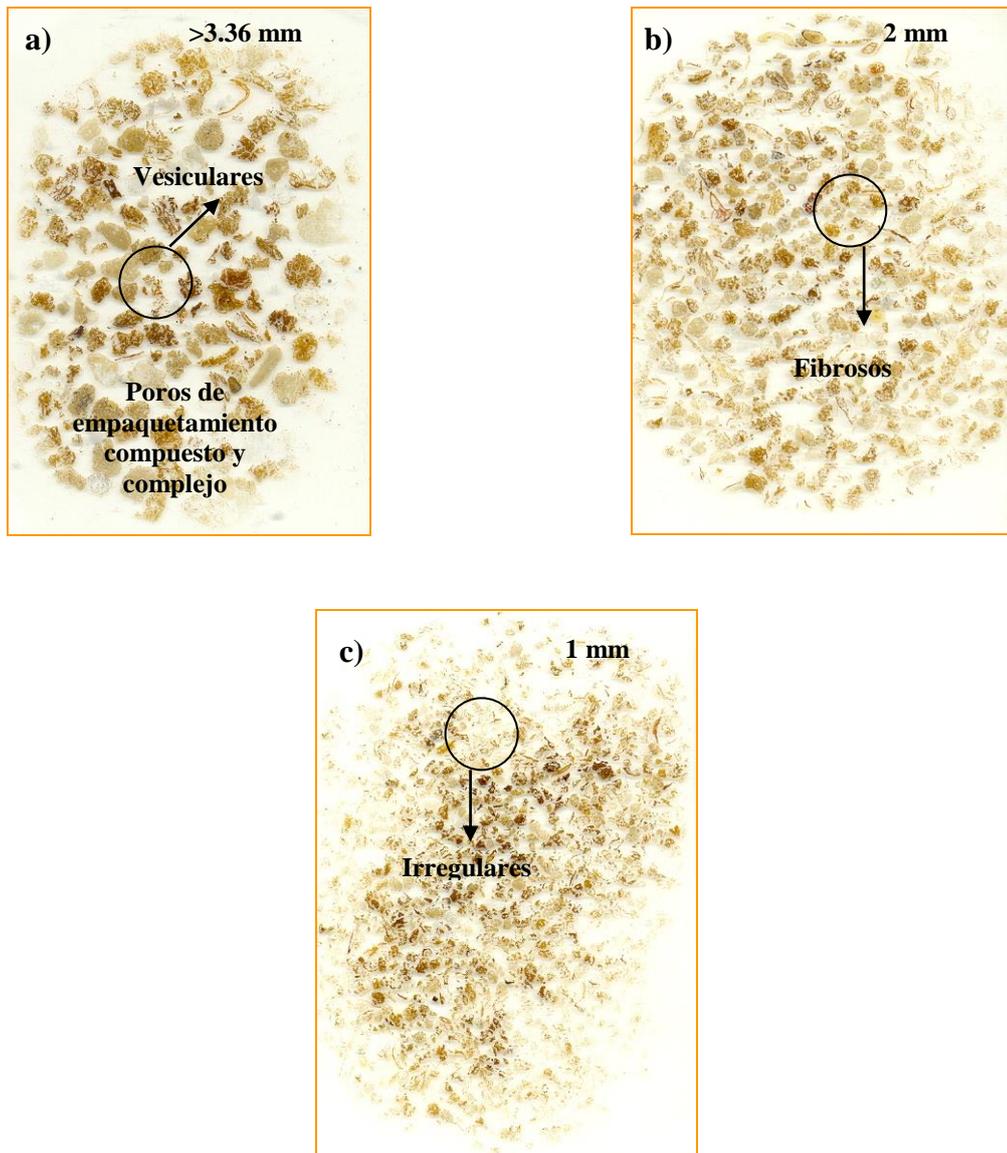


Figura 22. Secciones delgadas de vermicomposta en diferentes tamaños de partículas (dimensión de la sección delgada 5 x 7.5 cm).

b) Tamaño de poros

La vermicomposta presentó macroporos entre las partículas y microporos dentro de las mismas y se encontraron algunos minerales por ser un material complejo.

c) *Ubicación de los poros (inter e intra)*

La vermicomposta presentó el menor porcentaje de poros inter partícula en partículas de 2 mm (31%) y un mayor porcentaje de poros intra partícula (69%), presentando una capacidad de aireación intermedia (28.1%) y una menor cantidad de ADD (28.8%); mientras que el tamaño de partícula de 1 mm con 67% de porosidad inter partícula y 33% de porosidad intra partícula presentando una mayor CA (34%) y uno de los menores valores de ADD (24%) (Cuadro 15). La relación de poros inter e intra partícula y la capacidad de almacenar el agua, se debe a la forma de los poros, que garantizan la retención de humedad.

Cuadro 15. Propiedades micromorfológicas en diferentes tamaños de partícula en vermicomposta.

Descripción		Tamaño de partícula (mm)					
		<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Orden (%)	<i>Inter partícula</i>				67	31	43
	<i>Intra partícula</i>				33	69	57
Poros (%)	<i>P. E. Simple¹</i>						
	<i>P. E. Compuesto</i>				92	85	97
	<i>P. E. Complejo</i>				4	6	3
	<i>Vesícula</i>				4	7	
	<i>Fisuras</i>					2	
Forma (%)	<i>Vesícula</i>				4		
	<i>Tubular/Capilar</i>						
	<i>Fibrosa</i>					2	6
	<i>Irregular</i>				96	91	94
	<i>Acicular</i>						
	<i>Laminar</i>						
	<i>Fisuras</i>						

¹P. E. = Poros de empaquetamiento.

d) *Forma y frecuencia de los poros*

La forma de poros en vermicomposta son predominantemente de tipo irregular (mayor de 90%) y en menor porcentaje fibrosos (menor de 6%), que se encuentran conectados y vesiculares (4%) que no están conectados (Cuadro 15) (Figura 23).

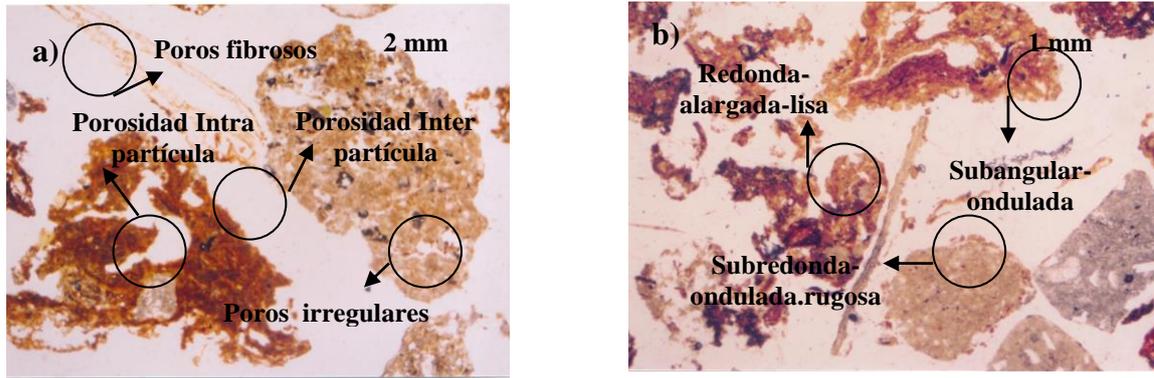


Figura 23. Vermicomposta: Porosidad inter e intra partícula y forma de poros (longitud del marco 5.3 mm LPP).

e) Diámetro de poros

La distancia de las partículas determina el tamaño de los poros, reportándose valores variables, dominando los diámetros de 50 a 500 μm (Cuadro 16).

Cuadro 16. Porcentaje de ocurrencia del diámetro de poros en vermicomposta.

Tamaño de partícula (mm)	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Diámetro de poro (μm)	Ocurrencia (%)					
0-50						
50-100				26.7	16.7	3.3
100-200				73.3	60	60
200-300					20	10
300-500					3.3	16.7
500-700						10
700-1000						
> 1000						

5.4.1.2 Partículas

a) Formas

La forma de las partículas de la vermicomposta es diversa de acuerdo al tipo de las mismas; presentándose formas redonda-alargada-lisa, subredonda-ondulada-rugosa, subangular-ondulada, subangular-rugosa y redonda lisa (vesícula).

5.4.2 Propiedades físicas

a) Tamaño de las partículas

Los resultados del tamaño de partícula en vermicomposta se muestran en el histograma de frecuencias (Figura 24) y se observó una distribución homogénea por clase de tamaño de partículas.

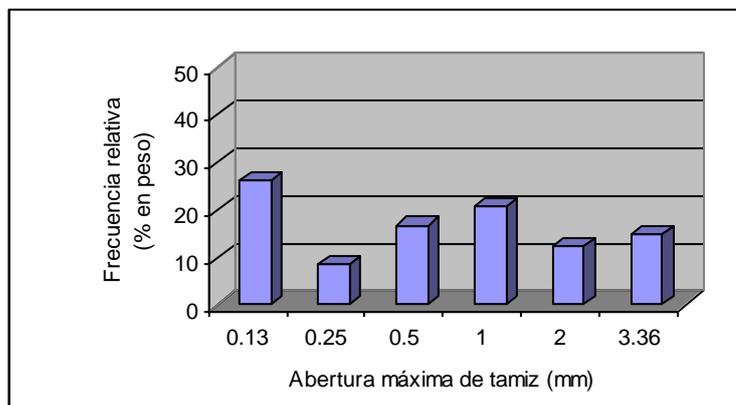


Figura 24. Histograma de frecuencias para la distribución granulométrica en vermicomposta.

b) Densidad aparente (DA)

Los valores fueron estadísticamente significativos y presentaron un comportamiento lineal en partículas menores que 2 mm, se encontró que a medida que disminuye el tamaño de partículas la DA aumenta; sin embargo, en partículas mayores de 3.36 mm la DA fue ligeramente mayor (0.64 g cm^{-3}) a la de 2 mm (0.63 g cm^{-3}) (Cuadro 17).

Cuadro 17. Densidad aparente y real en diferentes tamaños de partícula en vermicomposta.

Densidad (g cm^{-3})	Tamaño de partícula (mm)					
	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Aparente	0.9 a ¹	0.71 b	0.7 cb	0.66 cb	0.63 cb	0.64 c
Real	1.92 a	1.91 a	1.91 a	1.91 a	1.95 a	1.89 a

¹Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes dentro de cada hilera (Tukey, $p < 0.05$).

c) Densidad real (DR)

Los resultados mostraron una DR variable y no fueron valores estadísticamente significativos. El mayor valor se presentó en partículas de 2 mm (1.95 g cm^{-3}) y el menor en partículas mayores que 3.36 mm (0.89 g cm^{-3}) (Cuadro 17).

d) Espacio poroso total (EPT)

Los valores de EPT mostraron una tendencia lineal a partir de un tamaño de partícula de 2 mm, ya que a medida que disminuye el tamaño de partícula lo hace también el EPT, presentando valores estadísticamente significativos. El mayor valor se presentó en partículas de 2 mm (67.69%) y el menor valor en partículas menores que 0.13 mm (53.13%) (Cuadro 18).

Cuadro 18. Porosidad y retención de agua en diferentes tamaños de partícula en vermicomposta.

Porosidad y retención de agua (% volumen)	Tamaño de partícula (mm)					
	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
EPT ²	53.13 b ¹	62.83 a	63.35 a	65.45 a	67.69 a	66.14 a
CA	23.0 c	30.9 ba	28.5 b	34.0 a	28.1 b	34.0 a
AFD	3.6 c	9.6 a	9.8 a	4.0 c	6.6 b	1.3 d
AR	5.2 ba	0.6 d	0.8 d	3.4 c	4.1 bc	5.9 a
ADD	21.5 c	21.8 c	24.3 cb	24.0 cb	28.8 a	24.9 b
MS	46.88 a	37.17 b	36.65 b	34.55 b	32.31 b	33.86 b

¹Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes dentro de cada columna (Tukey, $p < 0.05$).

²EPT = Espacio poroso total, CA = Capacidad de aireación, AFD = Agua fácilmente disponible, AR = Agua de reserva, ADD = Agua difícilmente disponible y MS = Material sólido.

e) Retención de agua

En cuanto a la retención de agua, los resultados mostraron diferencias dependiendo del tamaño de partícula. Se observó que en partículas de 0.50 mm se encontró un mayor contenido de AFD (9.8%) (Cuadro 18) y la menor cantidad se reportó en partículas mayores que 3.36 mm (1.3%); cabe mencionar, que este tamaño de partículas también presentaron el mayor valor de capacidad de aireación (34%) y agua de reserva (5.9%); mientras que las de 1 mm también presentaron la mayor CA (34%) y valor intermedio de agua de reserva (3.4%). El mayor valor de ADD se encontró en partículas de 2 mm (28.8%); mientras que las partículas menores que 0.13 mm presentaron valores menores de CA (23%) y ADD (21.5%).

El modelo de regresión para la variable de ADD mostró una $r^2 = 0.857$ (Figura 25) y se observó que existe un incremento de ella con el aumento de partículas, hasta los 2 mm, para después permanecer casi sin cambios.

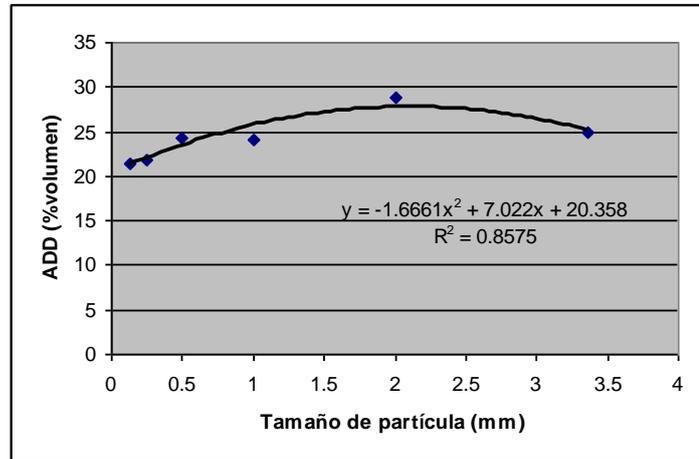


Figura 25. Relación entre el agua difícilmente disponible y el tamaño de partícula en vermicomposta.

f) Curva de liberación de agua

La Figura 26 muestra la curva de liberación de agua en vermicomposta y se puede observar que el tamaño de partícula está influyendo en la liberación de agua.

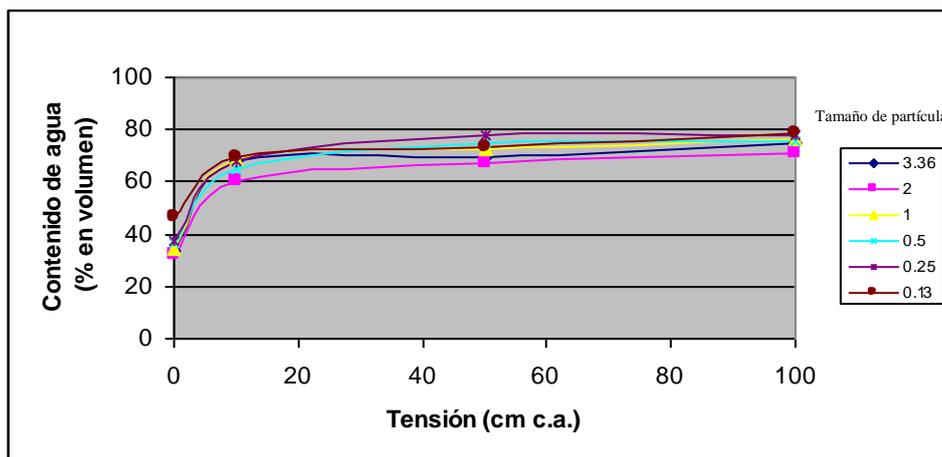


Figura 26. Curva de liberación de agua para vermicomposta en diferentes tamaños de partícula.

5.5. Tezontle

El tezontle es una roca ígnea extrusiva de origen volcánico (escoria volcánica) que se origina por el enfriamiento de lava y está constituido por silicatos de aluminio además de bióxido de hierro; los colores varían de rojo a naranja, gris y negro. Wallach *et al.* (1992) y Raviv *et al.* (2002) mencionaron que el tezontle se caracteriza por su alta porosidad y área superficial. Existen varios tipos de tezontle que se diferencian entre sí por su viscosidad, color y contenido de Fe, Mn, Ca y Mg; estas diferencias se relacionan con el contenido de sílice presente en la roca y la temperatura de erupción, por lo que sus características físicas son determinadas principalmente por su composición mineralógica (Raviv *et al.*, 2002).

Este material se somete a un proceso industrial de trituración para obtener la granulometría adecuada, se usa la fricción para perder ángulos y aristas, hasta que adquiere una forma redondeada de 2 a 50 mm. La textura es porosa (vesicular), por lo que es un material ligero, poco resistente, además de ofrecer buen drenaje y casi no aporta nutrientes, guarda el calor, no es permeable, ni aislante (Jaroslav, 1990). A pesar del valor que tiene, en la agricultura de México no se tiene el conocimiento específico de las propiedades físicas y micromorfológicas.

En México el tezontle es uno de los materiales inorgánicos usados con mayor frecuencia en los procesos de producción de hortalizas y ornamentales; debido a su bajo costo, disponibilidad, densidad aparente y real elevada, capacidad de aireación y poca retención de humedad en comparación con otros materiales. Actualmente, los productores presentan problemas en los procesos de producción, debido a que no conocen que tamaño de partícula deben utilizar.

5.5.1 Análisis micromorfológico

5.5.1.1 Porosidad

a. Tipo de poros

El análisis micromorfológico del tezontle mostró que las partículas forman poros de empaquetamiento simple y vesículas en todos los tamaños de partículas; la formación de mesoporos o cavidades se presentaron en partículas mayores de 0.25 mm (Figura 27a-f).

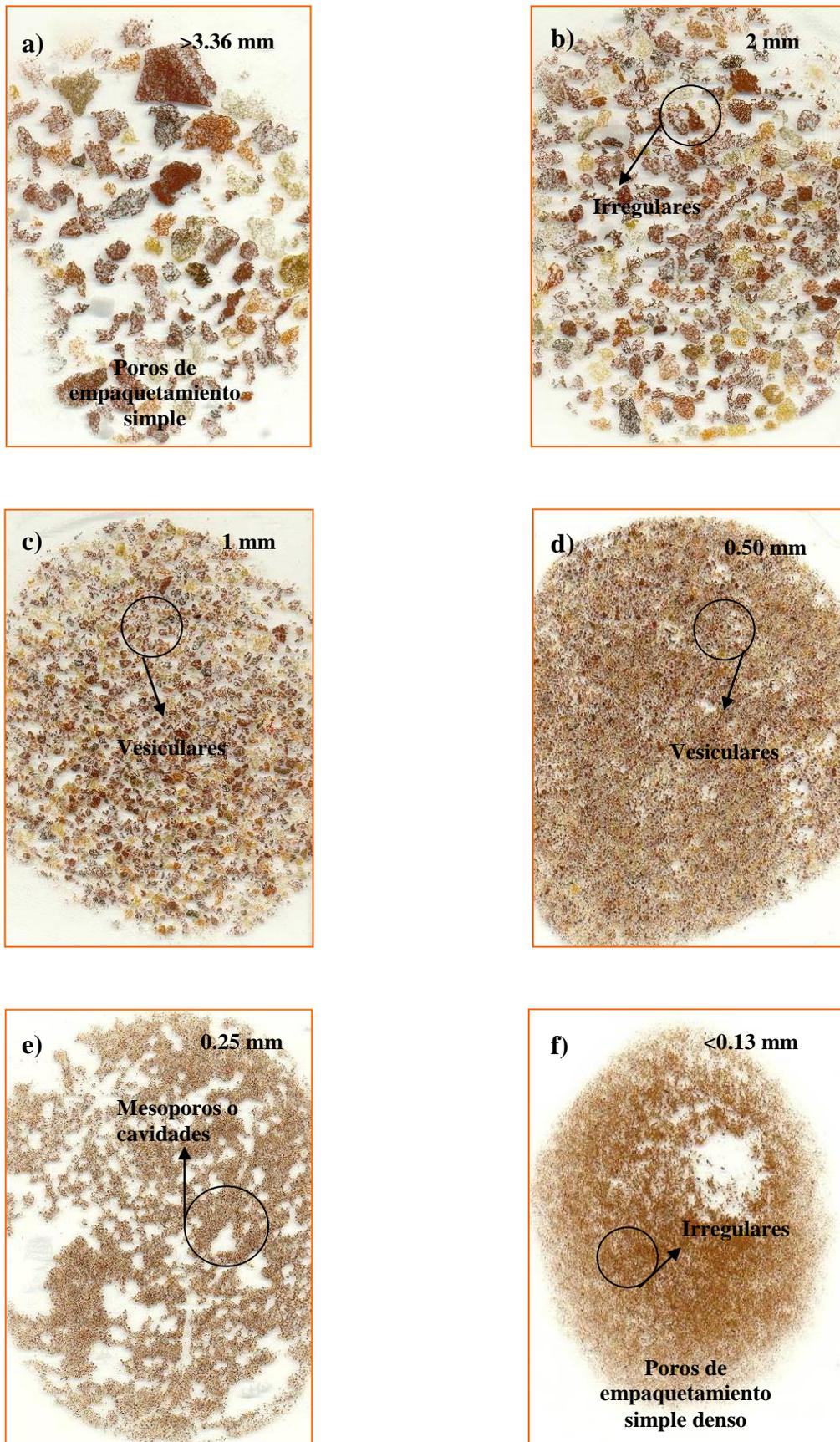


Figura 27. Secciones delgadas de tezontle en diferentes tamaños de partículas (dimensión de la sección delgada 5 x 7.5 cm).

De acuerdo con Bullock *et al.* (1985) los poros de empaquetamiento simple se encuentran en granos simples y no son de origen biológico. Estos se caracterizan porque son de equidimensionales a alargados; la mayoría no se encuentran interconectados (no son continuos) (Pape y Lager, 1995). En el caso de las vesículas, Pape y Lager (1995) mencionaron que se forman a consecuencia del atrapamiento de gas, por lo que presentan alta permeabilidad.

El tezontle es un material inorgánico por lo que dominan los poros de empaquetamiento simple y vesicular; sin embargo, cabe mencionar que a medida que el tamaño de partícula es más pequeño, los poros vesiculares tienden a desaparecer (Figura 28).

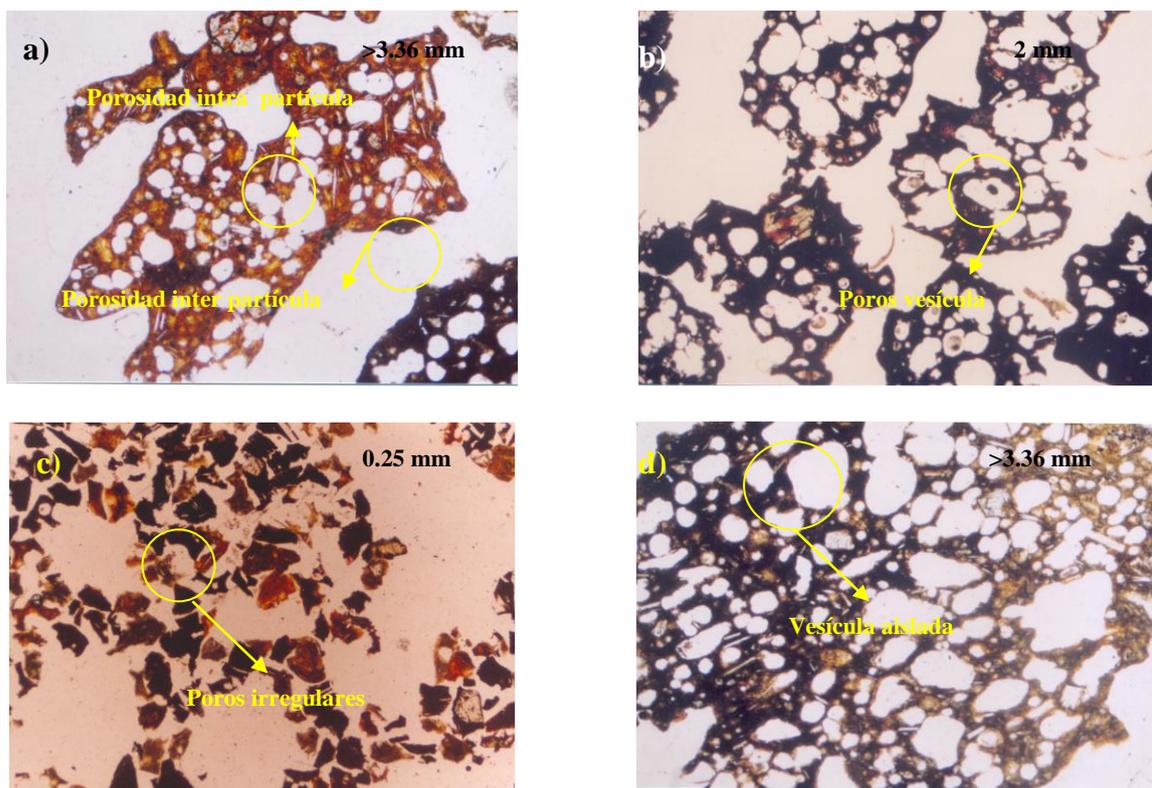


Figura 28. Tezontle: a) porosidad inter e intra partícula, b-c) forma de poros (longitud del marco 5.3 mm LPP) y d) forma de poros (longitud del marco 2.9 mm LLP).

b. Tamaño de poros

En el tezontle se presentaron macroporos (0.01 a 1 mm) y mesoporos (0.05 a 0.01 mm) entre las partículas y microporos (menores de 0.05 mm) dentro de las partículas. Brady y Weil (1999) mencionaron que los macroporos tienen función percolante y los microporos de almacenamiento (retienen agua y nutrimentos). Sin embargo, el tipo de macroporos no siempre tienen una función percolante, ya que algunos no están conectados; tal es el caso de las vesículas que no drenan, debido a eso pueden o no ser permanentes (Pape y Lager 1995). Los piroclastos contienen numerosas vesículas que parecen estar cerradas en muchas circunstancias (Wesley, 2001; Klug *et al.*, 2002; Fomenti y Druitt, 2003). Tamari *et al.* (2005) observaron una estructura vesicular, algunas menores de 40 µm y asumen que estas vesículas están cerradas.

c. Ubicación de los poros (inter e intra)

Los poros inter e intra partícula varían con el tamaño de las partículas y no tuvieron una tendencia lineal (Cuadro 19). Los resultados mostraron que el mayor porcentaje de poros inter partícula se presentó en partículas menores de 0.13 mm (100%); mientras que en las partículas de 2 mm ocurrió el menor porcentaje de poros inter partícula (49%) y el mayor porcentaje de poros intra partícula (51%) (Cuadro 19 y Figura 28a).

Cuadro 19. Propiedades micromorfológicas en diferentes tamaños de partícula en tezontle.

Descripción		Tamaño de partícula (mm)					
		<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Orden (%)	<i>Inter partícula</i>	100	86.4	84.3	75	49	77
	<i>Intra partícula</i>		13.6	15.7	25	51	23
Poros (%)	<i>P. E. Simple¹</i>	100	86.4	84.3	75	49	77
	<i>P. E. Compuesto</i>						
	<i>P. E. Complejo</i>						
	<i>Vesícula</i>		13.6	15.7	25	51	23
	<i>Fisuras</i>						
Forma (%)	<i>Vesícula</i>		13.6	15.7	25	51	23
	<i>Tubular/Capilar</i>						
	<i>Fibrosa</i>						
	<i>Irregular</i>	100	86.4	84.3	75	49	77
	<i>Acicular</i>						
	<i>Laminar</i>						
	<i>Fisuras</i>						

¹P. E. = Poros de empaquetamiento.

d. Forma y frecuencia de los poros

Los poros fueron de tipo irregular, conectados y no conectados, los cuales presentaron variaciones de acuerdo con el tamaño de partícula (Cuadro 19 y Figura 27b-f). En partículas mayores que 0.25 mm, también se presentaron poros tipo vesicular, los cuales no están conectados.

En México, aún no se ha definido qué tamaño de partícula tiene el mayor efecto sobre algunas propiedades físicas, debido a que presenta una proporción de porosidad denominada ocluida (PO), la cual está constituida por el volumen total de poros cerrados, que no tienen conexión con los poros externos y no pueden ser ocupados por agua. Por lo tanto, no intervienen en la relación agua/aire del sustrato y el único beneficio de este tipo de porosidad es la generación de un menor peso para los sustratos (Lemaire *et al.*, 1993). Al respecto, Burés *et al.* (1997) indicaron que en algunos casos es complicado correlacionar el tamaño de partícula con algunas propiedades hídricas debido a la presencia de la porosidad interna, ya que esta no es constante en los diferentes tamaños de partícula. Sin embargo, también es necesario tomar en cuenta el tamaño de las partículas y el origen de los materiales, ya que esto influye en las propiedades físicas del mismo.

e. Diámetro de poros

De acuerdo con la distancia que hay entre las partículas, los valores mostraron que dominan los diámetros entre 0 y 500 μm (Cuadro 20). En partículas mayores de 3.36 mm se presentaron una mayor variedad de formas, por lo que la distancia entre poros aumentó de 100 a mayores de 1000 μm ; mientras que las partículas más pequeñas menores de 1 mm, las formas fueron más homogéneas y el acercamiento entre poros fue más estrecho (0 y 200 μm). Es importante señalar la formación de mesoporos o cavidades en partículas menores de 1 mm (de 100 a 700 μm), los cuales desaparecen en tamaños menores que 0.13 mm. Es probable que la distancia entre partículas y el tipo de formas estén relacionadas con la capacidad de aireación y disponibilidad de agua.

Cuadro 20. Porcentaje de ocurrencia del diámetro de poros en tezontle.

Tamaño de partícula (mm)	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Diámetro de poro (µm)	Ocurrencia (%)					
0-50	56.6	36.7				
50-100	43.4	40	56.6	33.3		
100-200		23.3	43.3	66.7	70	40.1
200-300					20	23.3
300-500					10	23.3
500-700						6.7
700-1000						3.3
> 1000						3.3

5.5.1.2 Partículas

a. Forma

El tezontle presentó cinco diferentes tipos de formas: subangular-lisa, subredonda-lisa-ondulada, subangular-subredonda-lisa, subangular-ondulada-subredonda y vesiculares redonda-lisa (Figura 29a-d). Estas formas varían con el tamaño de partícula. Jaroslav (1990) reportó que el tezontle tiene formas variables desde las angulosas e irregulares hasta redondeadas.

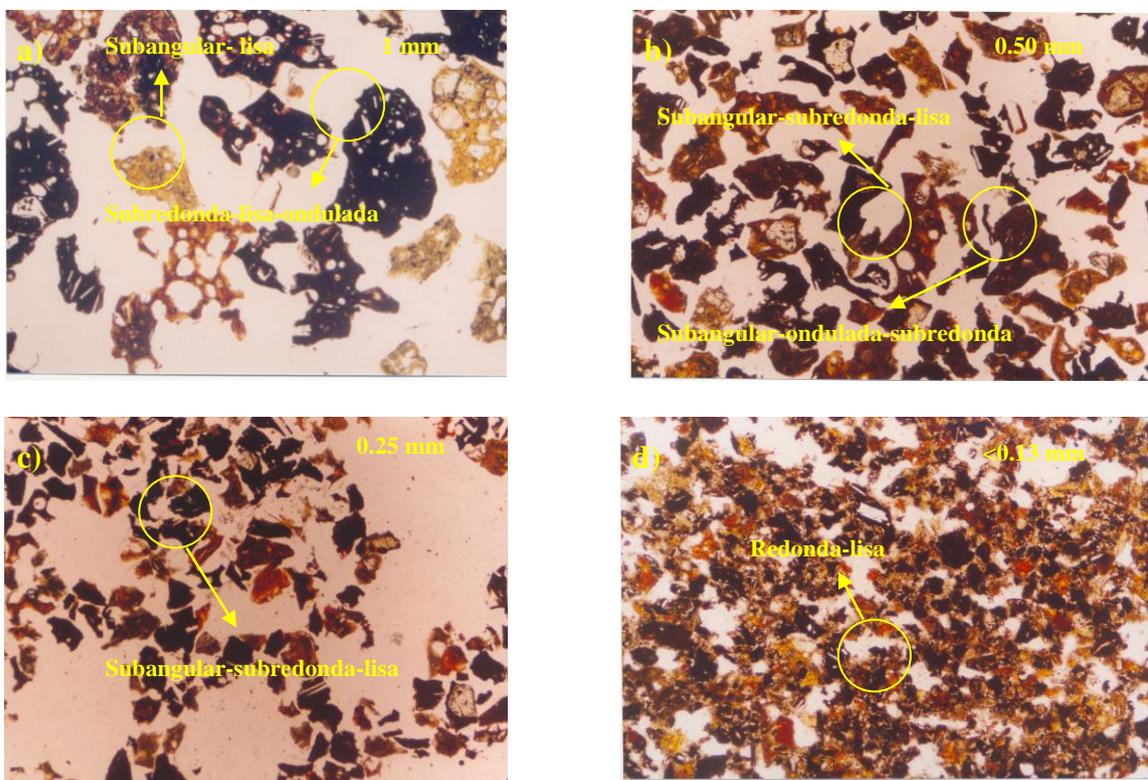


Figura 29. Formas de partículas en tezontle (longitud del marco 5.3 mm LPP).

5.5.2 Propiedades físicas

a. Tamaño de las partículas

Los resultados del tamaño de partícula de tezontle se muestran en el histograma de frecuencias (Figura 30); se observó una mayor dominancia de partículas mayores que 2 mm (95%). Esta característica dependerá de la granulometría que se demande en el lugar donde se adquiere el material. Existen diferencias en los tamaños de partícula para tezontle. La fracción más abundante fue la de 2 a 4 mm. Burés (1997) mencionó que las granulometrías más usadas están entre 2 y 50 mm. Sin embargo, en un histograma indicó que los mayores porcentajes de partículas se encontraron entre 2 y 16 mm (89%).

Wallach *et al.* (1992) reportaron 42% de partículas menores que 1 mm en tezontle rojo utilizado en Israel. Cabe señalar, que el principal problema en todos los materiales, tanto orgánicos como inorgánicos, es que los autores no mencionan el origen y tamaño de partícula utilizado, por lo que resulta complicado establecer relaciones con materiales semejantes.

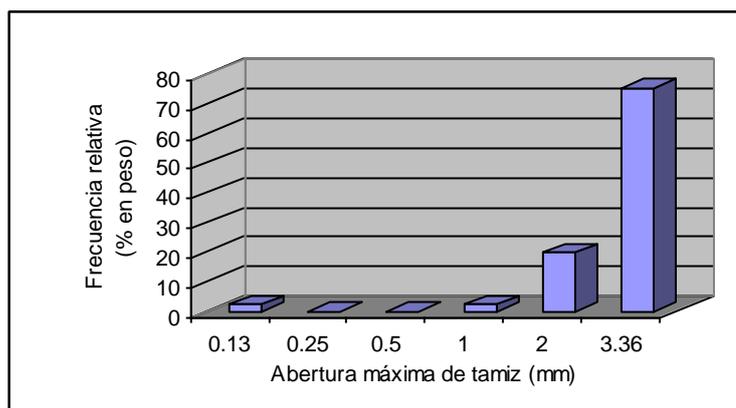


Figura 30. Histograma de frecuencias para la distribución granulométrica en tezontle.

Los productores suelen eliminar las partículas menores que 0.25 mm, material fino capaz de retener agua y sólo usan las partículas gruesas; no obstante el uso de tamaños menores de 0.13 mm puede provocar una baja capacidad de aireación que resulta ser un problema para el manejo.

b. Densidad aparente (DA)

El comportamiento de los valores de DA son estadísticamente significativos e irregulares, oscilan entre 0.82 y 1.43 g cm⁻³ (Cuadro 21); se observó que a partir de partículas menores que 2 mm, se presentó una tendencia lineal; es decir, a medida que disminuyó el tamaño de partícula aumentó la DA, presentando una r² de 0.7759. Los valores obtenidos en este análisis concuerdan con los de Raviv *et al.* (2002) indicando una DA entre 0.8 y 1.5 g cm⁻³. Cabe señalar, que existe poca información en la literatura acerca del efecto del tamaño de partículas en relación con las determinaciones de densidad de las mismas, en materiales que presentan una estructura vesicular.

Cuadro 21. Densidad aparente y real en diferentes tamaños de partícula en tezontle.

Densidad (g cm ⁻³)	Tamaño de partícula (mm)					
	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Aparente	1.43 a ¹	1.06 cb	0.97 cd	0.87 cd	0.82 d	1.19 b
Real	2.75 a	2.66 ba	2.75 a	2.62 ba	2.52 b	2.45 b

¹Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes dentro de cada hilera (Tukey, p< 0.05).

Los materiales inorgánicos no siempre presentan un comportamiento regular; por ejemplo, Pokorny y Henny (1984) trabajaron con arenas finas y gruesas (partículas de 0.42 a 4.76 mm) y reportaron que la densidad aparente es variable dependiendo del tamaño de las partículas, presentando valores de 1.58 y 1.65 g cm⁻³ para arenas finas y gruesas, respectivamente. Burés (1997) indicó valores de 0.77 g cm⁻³, mientras que Wallach *et al.* (1992) mencionaron resultados en diferentes tamaños de partícula de tezontle rojo de 0-1mm, 1-2 mm, 2-4 mm y 4-8 mm, correspondiendo los valores de 1.3 g cm⁻³, 0.95 g cm⁻³, 0.77 g cm⁻³ y 0.70 g cm⁻³, respectivamente. Finalmente, Jaroslav (1990) obtuvo densidades entre 1.2 y 1.6 g cm⁻³ y concluyó que la densidad aparente es variable, debido a que la porosidad es diferente de un trozo de roca a otro.

Por otro lado, Handreck y Black (1984) estimaron que la densidad de las partículas minerales es de aproximadamente 2.6 g cm⁻³ y mencionaron que se ve afectada por el grado de compresión y el arreglo de las partículas; indican además, que el empaquetamiento de estas es diferente dependiendo del tamaño, debido a que se

incrementa su compresibilidad y disminuye la porosidad interna, afectando el espacio que ocupan (estereometría). Sin embargo, de acuerdo con las secciones delgadas elaboradas en los sustratos, el arreglo de las partículas puede cambiar con el tamaño; es decir, no siempre se acomodan en forma de empaquetamiento. En la Figura 27a-f se muestra que en partículas mayores que 3.36 mm las partículas de tezontle se arreglan por empaquetamiento simple suelto, mientras que las partículas menores de 0.13 mm, presentaron un arreglo más compacto. La densidad aparente es relativamente mayor a la de otros materiales de origen volcánico como la piedra pómez y perlita, lo cual puede presentar ventajas y desventajas a nivel práctico.

c. Densidad real (DR)

Los resultados mostraron una DR variable y estadísticamente significativa (Cuadro 21), presentando una r^2 de 0.8935 (Figura 31), lo que indica que a medida que aumenta el tamaño de partícula disminuye la DR. El mayor valor se observó en partículas menores de 0.13 mm (2.75 g cm^{-3}) y el menor en partículas mayores que 3.36 mm (2.45 g cm^{-3}).

Estos resultados coinciden con los reportados por Chen *et al.* (1980) y MAPA, (2006) quienes sugirieron valores de DR entre 2.1 y 2.8 g cm^{-3} para tezontles rojos y negros de Israel y España.

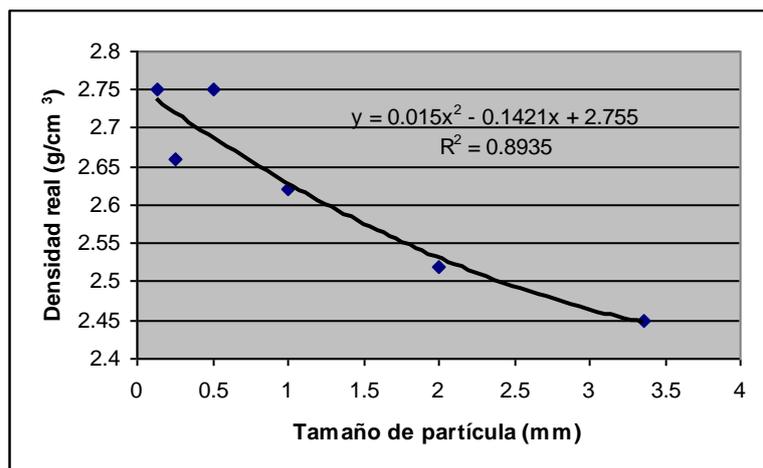


Figura 31. Relación entre la densidad real y el tamaño de partícula en tezontle.

La variación de la densidad en los materiales puede estar relacionada con el empaquetamiento o arreglo, tipo y forma de las partículas. Por ejemplo, en tamaños mayores, el tezontle presentó diferentes formas predominando la subangular, subredonda, lisa y ondulada, (Figura 29a-d); mientras que en partículas menores que 0.13 mm sólo se presentó una forma (redonda-lisa). En el caso de las partículas de 1 mm presentaron diversas formas, lo que generó un acomodamiento de las partículas diferente (formación de mesoporos o cavidades), lo cual puede ser una explicación del comportamiento irregular de esta variable.

Burés (1997) reportó una densidad real en tezontle a granel de 2.65 g cm^{-3} y mencionó que los primeros estudios de partículas se construyeron a partir de modelos esféricos, con el mismo tamaño, y empaquetamiento con diferentes formas; concluyó que las partículas tienen contacto con las más cercanas, por lo que las propiedades de empaquetamiento dependerán de dicho contacto (distancia). Tamari (2005) especuló que la densidad de las partículas se incrementa de acuerdo con la magnitud de trituración en las muestras, reportó además densidades reales en partículas de $74 \text{ }\mu\text{m}$ de 2.79 g cm^{-3} ; densidad que corresponde a materiales de composición basáltica con algunos grados de alteración. Sin embargo, Formenti y Druitt (2003) indicaron que es extremadamente difícil en la práctica determinar la densidad real en partículas de piedra pómez y tezontle, ya que contienen una gran cantidad de pequeñas vesículas ($1 \text{ }\mu\text{m}$).

d. Espacio poroso total (EPT)

Los resultados de EPT en tezontle son significativos y variables entre 48 y 67.5%, (Cuadro 22) presentando un comportamiento lineal en partículas menores que 2 mm, es decir, a medida que disminuye el tamaño de partícula también lo hace el EPT, lo cual coincide con lo reportado por Handreck (1983) y Wallach *et al.* (1992). Los rangos óptimos según Raviv *et al.* (2002) son entre 60 y 80%; mientras que Abad *et al.* (1993) sugirieron valores arriba del 85%. Burés (1997) reportó valores de EPT para tezontle entre 65 y 72%. Cabe señalar, que no mencionó en qué tamaño de partícula trabajó, lo cual es importante porque las propiedades físicas varían considerablemente con el tamaño de las partículas y el origen del material.

La mayor porosidad total se presentó en partículas de 2 mm de diámetro con 67.46% (Cuadro 22), debido a que las partículas generaron poros de formas vesiculares

(51%) e irregulares (49%) en partes iguales. De acuerdo con los resultados obtenidos el EPT puede estar en función al tamaño, forma y el arreglo de las partículas individuales del tezontle. Sin embargo, este cambio también se puede atribuir a la variable de DA, pero sobre todo con la DR, ya que se encontraron relacionadas, debido a que la organización y forma de las partículas, generan un volumen y peso diferente (Handreck y Blanck, 1984).

Cuadro 22. Porosidad y retención de agua en diferentes tamaños de partícula en tezontle.

Porosidad y retención de agua (%volumen)	Tamaño de partícula (mm)					
	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
EPT ²	48.00 c ¹	60.15 b	64.73 ba	66.79 ba	67.46 a	51.43 c
CA	0.9 d	30.7 b	37.8 a	42.1 a	29.0 b	11.0 c
AFD	19.2 a	22.0 a	18.9 a	10.5 b	14.8 ba	14.8 ba
AR	11.9 a	1.7 b	0.6 b	4.2 b	8.5 a	10.3 a
ADD	16.0 a	5.8 c	7.5 cb	10.1 b	15.1 a	15.3 a
MS	52.00 a	39.85 b	35.27 cb	33.21 cb	32.5 c	48.57 a

¹Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes dentro de cada columna (Tukey, $p < 0.05$).

²EPT = Espacio poroso total, CA = Capacidad de aireación, AFD = Agua fácilmente disponible, AR = Agua de reserva, ADD = Agua difícilmente disponible y MS = Material sólido.

El análisis estadístico mostró que el espacio poroso total en los diferentes tamaños de partículas tuvieron una r^2 de 0.7963 (Figura 32). Al incrementarse la DA el EPT disminuyó, solo a partir de partículas menores que 2 mm debido a la compresibilidad de las partículas, ya que la porosidad interna ocupada por el aire es menor y la retención de agua mayor. Cabe señalar, que la formación de mesoporos o cavidades de diferentes tamaños en estas partículas, son un factor que está determinando que ocurra un aumento o disminución de retención de agua (Cuadro 22).

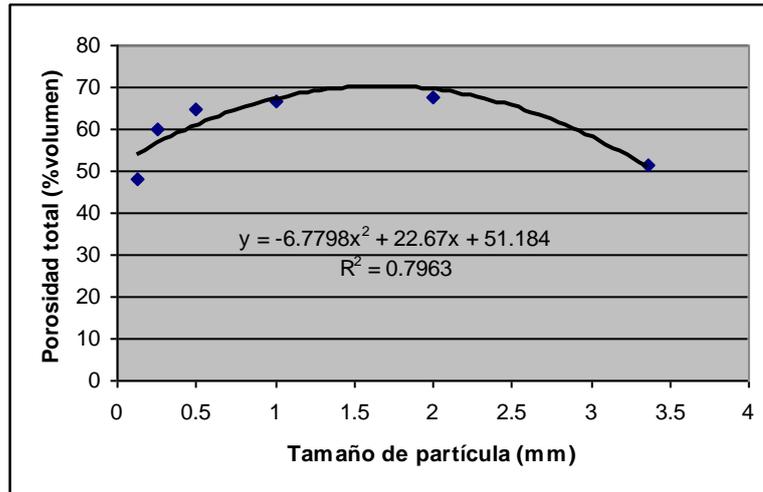


Figura 32. Relación entre la porosidad total y el tamaño de partícula en tezontle.

Finalmente, aunque las arenas con frecuencia son empleadas para incrementar la porosidad, las partículas pequeñas pueden alojarse en los espacios porosos existentes y reducir la aireación y el drenaje (Ward *et al.*, 1987).

e. Retención de agua

La capacidad de aireación (CA) mostró valores estadísticamente significativos y variables dependiendo del tamaño de partícula. La mayor CA se presentó en partículas con tamaño de 0.25 a 1 mm, teniendo el menor valor en partículas menores que 0.13 mm (0.9%) (Cuadro 22). Al comparar estos resultados con el tipo y la distancia del poro, se encontró que en las partículas menores de 0.13 mm dominaron los poros de 50 a 200 μm (73.3%) y poros inter partícula (100%), características que le permitieron la percolación y disponibilidad de agua.

La CA es importante en los sustratos, debido a la facilidad que tienen éstos para proporcionar un nivel suficiente de oxígeno y agua a la raíz, resaltando que un buen suministro de oxígeno en la zona radical propicia efectos inmediatos sobre la forma y el crecimiento de la misma, así como un incremento de la actividad metabólica, absorción de agua y nutrimentos (Raviv *et al.*, 2004). Las fracciones entre 0.5 y mayores que 3.36 mm se pueden considerar como óptimas para proporcionar una aireación de 10 a 30% según Abad *et al.* (1993); mientras que Burés (1997) mencionó que el tezontle tiene una elevada CA de 45 a 65%. De acuerdo con Brady y Weil (1999) las partículas del suelo que

presentan tamaño de arena tienen mayor capacidad de aire, debido a que las fuerzas de cohesión son menores por la baja superficie específica.

El comportamiento de las partículas en tezontle en cuanto a la capacidad retención de agua (fácilmente disponible, de reserva, o difícilmente disponible) (Cuadro 22) es diferente dependiendo del tamaño, forma y distancia de las partículas. Los valores más altos de AFD se encontraron en partículas menores de 0.50 mm. Una explicación, es la formación de mesoporos o cavidades que se originaron debido al acomodamiento de las partículas (entre 100 y 700 μm). Los poros menores de 100 μm almacenan al agua y los mayores la percolan siempre y cuando se presenten poros inter partícula. Cabe señalar, que esto es parcialmente verdadero pues los poros intra partícula (independientemente de su tamaño) pueden modificar la capacidad de aire y el almacenamiento de agua.

Las partículas mayores que 3.36 mm presentaron valores intermedios de agua fácilmente, difícilmente disponible y de reserva o almacenada de 14.8, 15.3, y 10.3%, respectivamente. En el caso de las partículas de 1 mm, el tamaño de poros fue de 50 a 200 μm (100%) con 75% de poros inter partícula; factores que proporcionan una mayor CA (42.1%), pero impiden el drenaje de agua teniendo una menor disponibilidad de la misma (10.5%) y una retención intermedia (10.5 y 4.2% de ADD y AR, respectivamente) (Cuadro 22), las partículas gruesas, retienen poca agua fácilmente disponible (Burés, 1997).

Los valores de retención de humedad son diversos, por ejemplo Handreck (1983) indicó que la mayor cantidad de agua fácilmente disponible se encontró en partículas de 0.25 a 0.50 mm en corteza de pino y arena, lo cual concuerda con los datos obtenidos en el presente trabajo. Burés (1997) observó que el tezontle presenta baja capacidad de retención de AFD (6.55%), AR (1.63%) y ADD (14.31%). El AFD según Abad *et al.* (1993) tiene que tener un intervalo entre 20 y 30% y el AR entre 4 y 10%; mientras que Chen *et al.* (1980) reportaron valores de 1 a 2% de AR. Las propiedades físicas varían considerablemente con el tamaño de las partículas y el origen del material.

f. Curva de liberación de agua

Los resultados de la curva de liberación de agua se muestran en la Figura 33. En esta figura se puede observar que el tamaño de partícula influye en la liberación de agua. Varios autores reportaron diferentes tamaños de partículas de tezontle para su uso como

sustrato; por ejemplo, Whitcomb (1988) recomendó partículas uniformes entre 2 y 3 mm; Matkin y Chandler (1957) especificaron arenas finas de 0.05 a 0.5 mm y Swanson (1989) sugirió que 60% del sustrato debe estar compuesto de partículas de arena entre 0.25 y 1 mm.

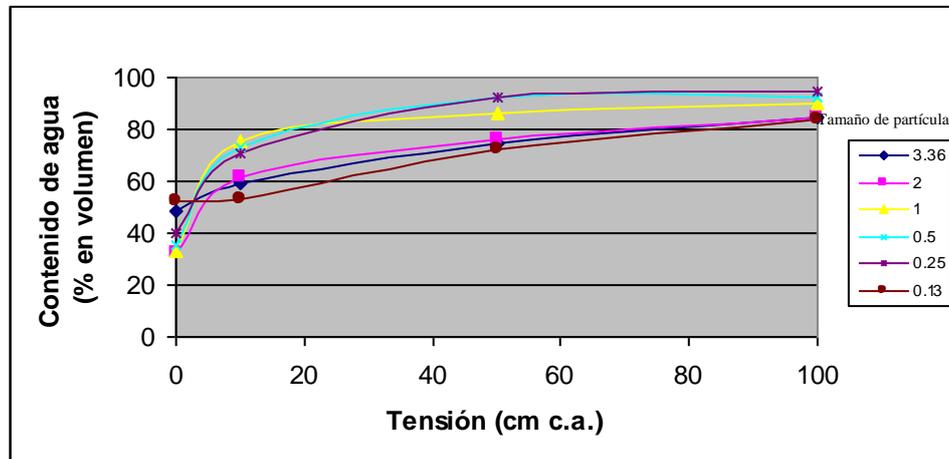


Figura 33. Curva de liberación de agua para tezontle en diferentes tamaños de partícula.

5.6 Perlita o Agrolita

La perlita es uno de los materiales inorgánicos más usados y estudiados a nivel mundial. Es una roca volcánica vítrea (silicato de aluminio) formada por el enfriamiento rápido, constituye un material amorfo que contiene entre 2 y 5% de agua atrapada. Este mineral en su manipulación industrial se granula y precalienta de 300 a 400 °C y se vierte en hornos a 1 000 °C, donde por efecto de las altas temperaturas, el agua atrapada se evapora rápidamente, expandiéndose en el proceso de materia para formar una espuma blanca y ligera. La perlita se extrae en los hornos por aspiración y se transporta a los mecanismos de molienda y cribado, donde se obtiene el tamaño de partículas deseadas (Burés, 1997). Debido a las elevadas temperaturas a que es sometida durante su procesamiento, la perlita es completamente estéril (Landis *et al.*, 1990).

5.6.1 Análisis micromorfológico

5.6.1.1 Porosidad

a. Tipo de poros

El análisis micromorfológico de la perlita mostró que las partículas formaron dos tipos de poros: de empaquetamiento simple y vesículas (en todos los tamaños de partículas) (Figura 34a-f). Las vesículas se presentaron dentro de las partículas pero también se desarrollaron entre partículas principalmente en tamaños menores de 0.50 mm.

Los poros de empaquetamiento simple se observaron entre granos simples y no son de origen biológico (Bullock *et al.*, 1985) (Figura 34 y Figura 35) son equidimensionales o alargados (Pape y Lager, 1995). En el caso de las vesículas, Pape y Lager (1995) mencionaron que se generan a consecuencia del atrapamiento de gas, por lo que presentan alta permeabilidad. La perlita tiene una estructura interna ocluida (vesículas) por lo que el agua es retenida sobre la superficie o en los espacios entre sus partículas (Handreck y Black, 1994). Bunt (1988) mencionó que algunas partículas de perlita son cerradas y el agua no penetra por las estructuras micelares indicando que para que la porosidad de la perlita sea efectiva debe mezclarse con otros materiales.

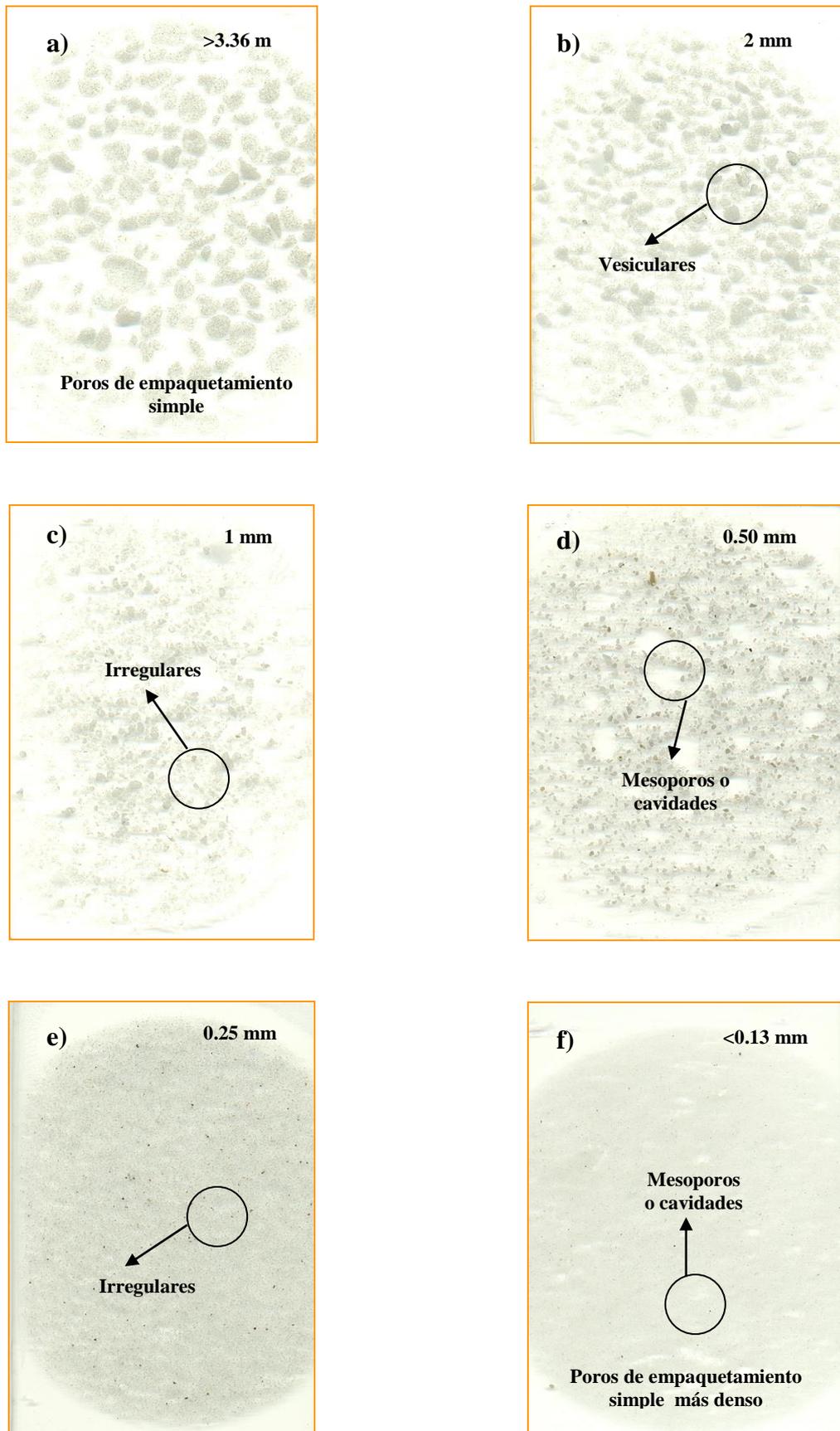


Figura 34. Secciones delgadas de perlita en diferentes tamaños de partículas (dimensión de la sección delgada 5 x 7.5 cm).

La perlita es un material inorgánico volcánico y se esperaba solo el acomodamiento simple de las partículas; sin embargo, en el tamaño intermedio (partículas de 1mm) se generaron vesículas o cavidades, probablemente como resultado de burbujas de aire de la resina. Como se ha discutido en otros materiales, la generación de vesículas es un fenómeno común sobre todo en tezontle y piedra pómez. No obstante, la formación de este tipo de poros sólo se presentó predominantemente en partículas intermedias y desaparecieron en partículas pequeñas a diferencia del tezontle y la piedra pómez.

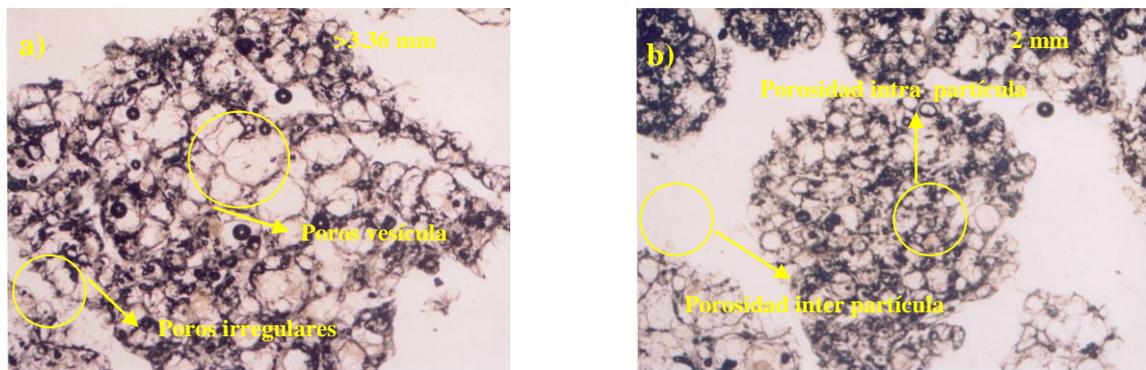


Figura 35. Perlita: a) forma de poros, b) porosidad inter e intra partícula (longitud del marco 5.3 mm LPP).

b. Tamaño de poros

La perlita presentó macroporos (0.01 a 1 mm) y mesoporos (0.05 a 0.01mm) entre las partículas y microporos (< 0.05 mm) dentro de las partículas. Debido a que la perlita tiene una estructura cerrada, el porcentaje de poros no percolantes o cerrados al exterior es elevada, lo cual le permite retener el agua tanto en la superficie como en los poros internos (Burés, 1997). Moore (1988) mencionó que la textura irregular de la superficie de las partículas de perlita, genera espacios de macroporos.

c. Ubicación de los poros (inter e intra)

Los poros inter e intra partícula varían con el tamaño de las mismas (Figura 35b) mostrando una tendencia lineal (Cuadro 23). El mayor porcentaje de poros inter partícula se presentó en tamaños menores de 0.13 mm (93%), lo que significa una mayor compactación. En el caso de las partículas mayores de 3.36 mm ocurrió tanto el menor

porcentaje de poros entre (55.2%) como el mayor porcentaje de poros intra partícula (44.8%) (Cuadro 23).

Cuadro 23. Propiedades micromorfológicas en diferentes tamaños de partícula en perlita.

Descripción		Tamaño de partícula (mm)					
		<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Orden (%)	<i>Inter partícula</i>	93	82.8	79.1	67.3	65	55.2
	<i>Intra partícula</i>	7	17.2	20.9	32.7	35	44.8
Poros (%)	<i>P. E. Simple¹</i>	93	82.8	79.1	67.3	65	55.2
	<i>P. E. Compuesto</i>						
	<i>P. E. Complejo</i>						
	<i>Vesícula</i>	7	17.2	20.9	32.7	35	44.8
	<i>Fisuras</i>						
Forma (%)	<i>Vesícula</i>	7	17.2	20.9	32.7	35	44.8
	<i>Tubular/Capilar</i>						
	<i>Fibrosa</i>						
	<i>Irregular</i>	93	82.8	79.1	67.3	65	55.2
	<i>Acicular</i>						
	<i>Laminar</i>						
	<i>Fisuras</i>						

¹P. E. = Poros de empaquetamiento.

d. Forma y frecuencia de los poros

Los poros de empaquetamiento simple fueron de tipo irregular, conectados y presentaron variaciones de acuerdo con el tamaño de partícula (Cuadro 23 y Figura 34a-f); también se presentaron poros de tipo vesicular, los cuales no están conectados.

Al comparar los poros inter e intra partícula de la perlita con la piedra pómez, los resultados indicaron que tienen un comportamiento inverso, debido principalmente a las formas de los poros vesícula (Figura 35a-b). En la pómez son tubulares conectadas, mientras que en la perlita, son circulares no conectadas. Este material presentó menor porcentaje de poros intra partícula (44.8%) que la piedra pómez (58.3%) y el tezontle (51%).

e. Diámetro de poros

De acuerdo con la distancia que hay entre las partículas, los diámetros que dominaron fueron de 0 a 300 μm (Cuadro 24). Debido a que las partículas mayores de 3.36 mm presentaron una mayor variedad de formas, la distancia entre poros fue mayor (entre 100 y 700 μm); mientras que las partículas más pequeñas (menores de 1 mm) con formas más homogéneas, el acercamiento fue más estrecho (0 y 200 μm). Cabe señalar, la formación de mesoporos en partículas menores que 0.50 mm (de 100 a 700 μm), los cuales fueron más pequeños al disminuir el tamaño de partículas (menores de 0.13 mm).

Cuadro 24. Porcentaje de ocurrencia del diámetro de poros en perlita.

Tamaño de partícula (mm)	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Diámetro de poro (μm)	Ocurrencia (%)					
0-50	80	43.3	26.7	6.7		
50-100	20	50	43.3	36.7	3.3	
100-200		6.7	23.3	43.3	70	50
200-300			6.7	13.3	16.7	20
300-500					10	16.7
500-700						13.3
700-1000						
> 1000						

5.6.1.2 Partículas

a. Forma

La perlita presentó diferentes tipos de formas: subredonda-rugosa, subangular-rugosa, subredonda-rugosa-ondulada y cuatro formas vesiculares: redonda-lisa-ondulada, subredonda-lisa-ondulada, redonda-ondulada y subredonda-ondulada (Figura 36), estas formas fueron diferentes de acuerdo con el tamaño de partícula.

Burés (1997) mencionó que la superficie rugosa de las partículas contiene numerosas indentaciones, lo cual le proporciona una gran área superficial y permite que pueda retener agua en la superficie, además del agua retenida en los poros internos.

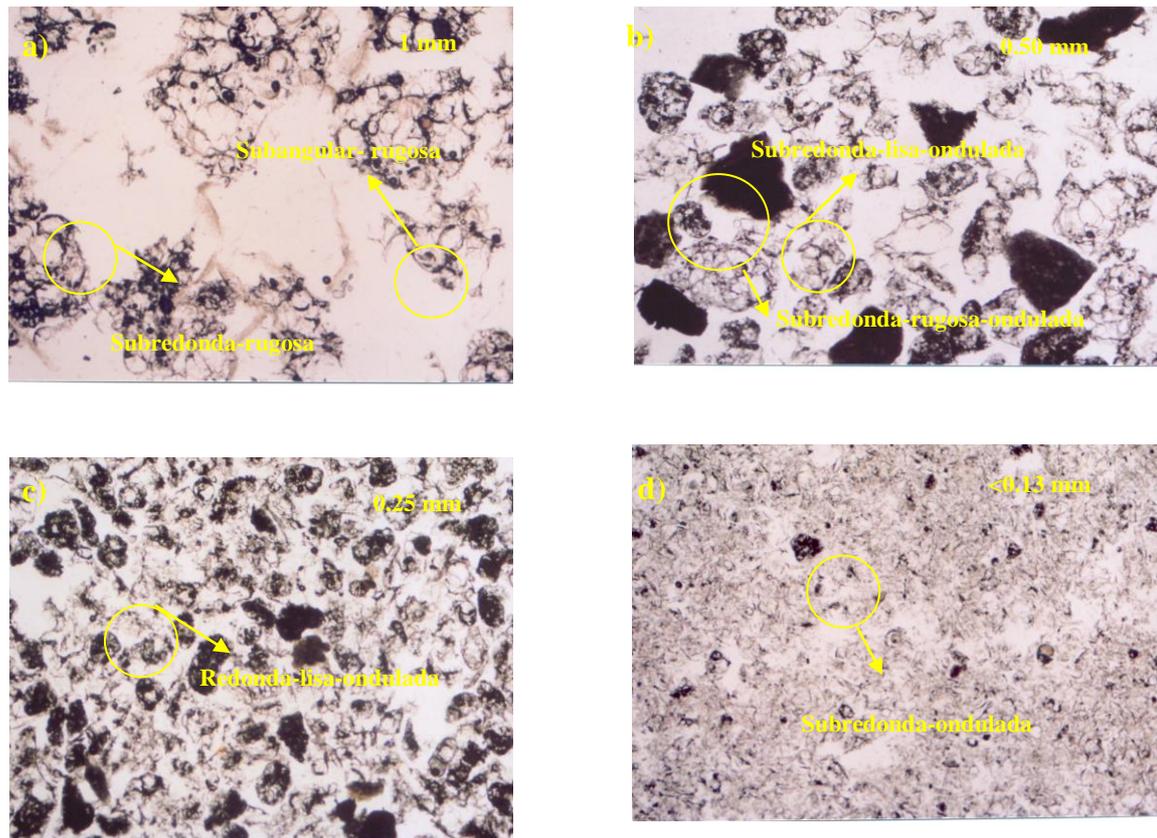


Figura 36. Formas de partículas en perlita (longitud del marco 5.3 mm LPP).

5.6.2 Propiedades físicas

a. Tamaño de las partículas

Los resultados del tamaño de partícula de la perlita se muestran en el histograma de frecuencias en la Figura 37 y mostró que hay una mayor dominancia de partículas mayores que 0.50 mm (93.2%); por lo tanto, la distribución del tamaño de partículas es más homogénea que otros materiales inorgánicos como el tezontle y la piedra pómez.

Burés (1997) realizó un histograma reportando partículas dominantes entre 2 y 4 mm (91%). La perlita sólo tiene diferencias en la composición de la granulometría y especialmente en tamaños gruesos. El orden de optimización de los sustratos tiene una mezcla de diferentes tamaños en el mismo material o uso de diferentes fracciones de diversos materiales (mezclas) (Verdonck, 2004).

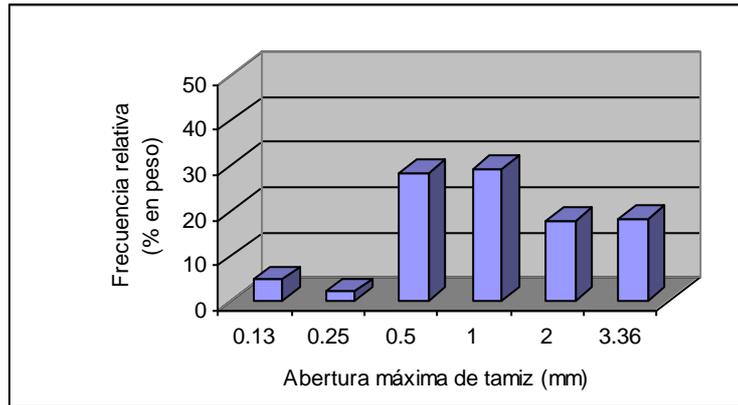


Figura 37. Histograma de frecuencias para la distribución granulométrica en perlita.

Verdonck (2004) mencionó que el tamaño de partícula es un factor importante en la determinación de la relación agua/aire, trabajó tamizando dos materiales de perlita (fina y gruesa) sin mencionar el origen de este, obteniendo fracciones en los siguientes intervalos de 0-1; 1-2; 2-3; 3-5 y 5-8 mm. Este autor reportó valores para perlita fina de 68.2, 27.6, 3.8, 0.4 y 0%, respectivamente; mientras que en perlita gruesa los valores fueron de 26.3, 46.3, 22.8, 4.1 y 0.5%, respectivamente.

Por ejemplo, el Instituto Perlita (1983) indicó diferentes grados: el 6, 8 mm y el de propagación; con tamaños promedios de partículas de 3.35 mm, 1.70 mm y 3.20 mm, respectivamente. Estos tamaños son comúnmente usados en los medios de crecimiento. Los materiales de tamaños inferiores que 0.25 mm generan problemas de exceso de agua en el sustrato, prefiriendo cultivar en tamaños mayores de 1 mm.

La perlita comercial se vende con diferentes tamaños de partículas (Burés, 1997). Los tipos de perlita tampoco son uniformes y contienen un intervalo de tamaños, dependiendo del tamiz utilizado en su manufactura. Actualmente, no hay estándares de tamaños, por lo que cada fabricante tiene su propio sistema de clasificación, el cual puede variar de acuerdo al tamaño, embalaje y la procedencia del material (Instituto Perlita, 1983).

b. Densidad aparente (DA)

Los valores de DA fueron significativos y presentaron un comportamiento con tendencia lineal, es decir, a medida que esta disminuye, el tamaño de partícula se incrementa. La mayor densidad se observó en partículas menores de 0.13 mm (0.32 g cm^{-3}) y la menor en partículas mayores de 3.36 mm (0.14 g cm^{-3}) (Cuadro 25).

Cuadro 25. Densidad aparente y real en diferentes tamaños de partícula en perlita.

Densidad (g cm^{-3})	Tamaño de partícula (mm)					
	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Aparente	0.32 a ¹	0.22 b	0.22 b	0.15 c	0.15 c	0.14 c
Real	1.90 a	1.20 b	1.30 b	1.00 cb	0.75 cd	0.62 d

¹Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes dentro de cada hilera (Tukey, $p < 0.05$).

La perlita es un material muy ligero de densidades alrededor de 0.1 g cm^{-3} y con tamaños de partícula usualmente entre 1.6 y 3 mm (Landis *et al.*, 1990). Burés (1997) reportó una densidad aparente en partículas de 0.25 a 0.5 mm de 0.112 g cm^{-3} y en partículas de 0.5 a 1 mm de 0.145 g cm^{-3} ; mientras que Verdonck *et al.* (1983) trabajaron con perlita gruesa y reportaron una DA de 0.193 g cm^{-3} , y para perlita fina 0.064 g cm^{-3} . Los resultados obtenidos de densidad aparente son ligeramente más altos que los reportados por estos autores a excepción de algunos tamaños de partículas.

Al realizar el análisis estadístico, se encontró que el tamaño de partículas se relaciona con la DA con una r^2 de 0.7851 (Figura 38).

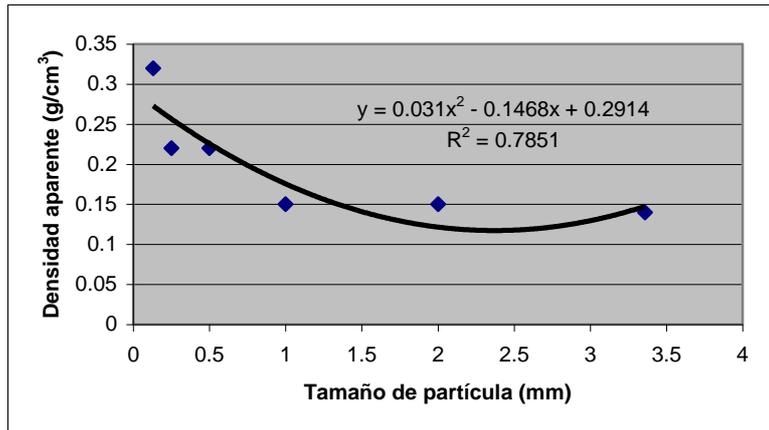


Figura 38. Relación entre la densidad aparente y el tamaño de partícula en perlita.

Nelson (1978) reportó que una mezcla de sustrato hecho con vermiculita y perlita, presentó una densidad de alrededor de 0.51 g cm^{-3} saturado con agua, mientras que en seco, obtuvo una densidad de 0.10 g cm^{-3} . Es importante resaltar, que los productores interesados en mantener un peso ligero en los sustratos, pueden considerar a la perlita como un componente, pues este material es relativamente hidrofóbico (Whitcomb, 1988).

c. Densidad real (DR)

Los valores obtenidos fueron estadísticamente significativos y variables (Cuadro 25), presentando una r^2 de 0.8139 (Figura 39). La mayor DR se observó en partículas menores de 0.13 mm con 1.9 g cm^{-3} y la menor en partículas mayores de 3.36 mm con 0.62 g cm^{-3} . Burés (1997) reportó una DR de 2.65 g cm^{-3} muy por encima de los valores obtenidos, sin mencionar el tamaño de partícula con la que trabajó.

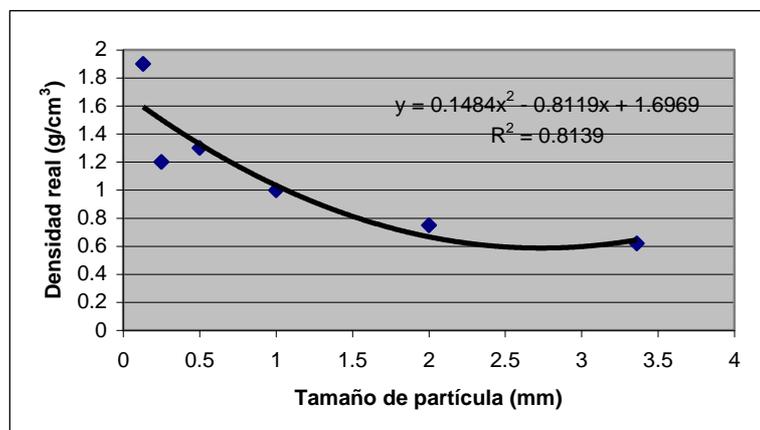


Figura 39. Relación entre la densidad real y el tamaño de partícula en perlita.

La variación de la DR de este material puede estar relacionada con el empaquetamiento o arreglo, tipo y forma de las partículas; es decir, entre mayor tipo de formas se encuentren (redonda, subredonda, subangular, ondulada, rugosa, lisa) menor compactación con el picnómetro, observándose que a menor tamaño, las formas y el acomodamiento fue distinto (Figura 36).

Los primeros estudios de partículas se construyeron a partir de modelos esféricos con el mismo radio y las empaquetaron en diferentes formas, por lo que las propiedades de empaquetamiento dependerán del contacto y la proximidad que hay entre ellas (Burés, 1997).

d. Espacio poroso total (EPT)

Los resultados de EPT en perlita fueron estadísticamente diferentes, presentando valores entre 77.4 y 85% (Cuadro 26), teniendo un comportamiento irregular de acuerdo con el tamaño de partícula. El mayor EPT se presentó en partículas de 1 mm de diámetro con 85%, debido a que las partículas generaron poros de formas vesiculares (32.7%) e irregulares (67.3%), lo cual puede estar en función al tamaño, forma y arreglo de las partículas individuales de la perlita.

Burés (1997) mencionó que la perlita tiene un EPT de 95.47%, sin embargo, no mencionó el tamaño de partículas con las que se trabajó. Verdonck *et al.* (1983) trabajaron con perlita gruesa y reportaron un EPT de 90.9%, mientras que en perlita fina los valores fueron de 97%.

La perlita es un material rígido y no se comprime con facilidad, lo cual promueve una buena porosidad y por ende una mejor aireación al sustrato en comparación con la arena (Ward *et al.*, 1987).

Cuadro 26. Porosidad y retención de agua en diferentes tamaños de partícula en perlita.

Porosidad y retención de agua (% volumen)	Tamaño de partícula (mm)					
	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
EPT ²	83.16 a ¹	81.67 ba	83.08 ba	85.00 a	80.00 ba	77.42 b
CA	6.7 d	14.5c	8.6 d	18.0 b	8.2 d	40.9 a
AFD	12.4 c	43.6 a	42.5 a	22.4 b	24.5 b	10.0 c
AR	12.6 a	6.1 c	12.3 a	11.3 b	11.8 ba	7.1 c
ADD	51.4 a	17.5 c	19.7 c	33.2 b	35.4 b	19.4 c
MS	16.84 b	18.33 ba	16.92 ba	15.00 b	20.00 ba	22.58 a

¹Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes dentro de cada columna (Tukey, $p < 0.05$).

²EPT = Espacio poroso total, CA = Capacidad de aireación, AFD = Agua fácilmente disponible, AR = Agua de reserva, ADD = Agua difícilmente disponible y MS = Material sólido.

e. Retención de agua

El comportamiento de las partículas en perlita en cuanto a retención de agua (fácilmente disponible, de reserva, o difícilmente disponible) y capacidad de aireación (Cuadro 26) es diferente dependiendo del tamaño, forma y distancia de las partículas.

En el Cuadro 26 se puede apreciar que la capacidad de retención de agua varía con el tamaño de partícula. Por ejemplo, partículas mayores que 3.36 mm (tamaño de grava) presentaron una mayor CA (40.9%), mientras que las partículas de 0.13 mm (tamaño de arena) (poros de 0 a 50 μm) tuvieron sólo 6.7%. Las partículas de 0.25 y 0.50 mm, mostraron el mayor porcentaje de AFD (43.6 y 42.5%, respectivamente) y valores bajos de CA (14.5 y 8.6%, respectivamente). Cuando se comparan estos resultados con el tipo y la distancia del poro, superficie específica (tamaño) y fuerzas de adhesión se puede explicar este comportamiento irregular, ya que estas partículas presentaron una mayor superficie específica, además, de la formación de mesoporos, debido al acomodamiento de las partículas (entre 0 y 100 μm). En el caso de los tamaños más grandes (mayores de 3.36 mm) la superficie específica disminuyó generando más espacio poroso (poros de 100 y 500 μm), lo que permitió la percolación del agua, de ahí que los valores de AFD sean bajos (10%) e intermedios en ADD y AR o almacenada (19.4 y 7.1%, respectivamente).

Verdonck *et al.* (1983) trabajaron con perlita gruesa y reportaron una CA de 57.7% y AFD de 4.2% y perlita fina valores de CA de 20.4% y AFD 42.9%. Burés (1997) indicó valores de CA de 74.40%, AFD de 5.13%, AR de 1.39% y ADD de 14.55%; sin embargo no mencionaron el origen del material, ni el tamaño de partícula usada, por lo que los resultados difieren de los obtenidos en el presente estudio.

Por otro lado, la perlita tiene una estructura interna ocluida y por eso el agua sólo es retenida sobre la superficie o en los espacios entre sus partículas. Bunt (1988) y Handreck y Black (1994) indicaron que esta característica es útil para proporcionar porosidad y retención de agua de hasta 5 veces su peso; las granulometrías más gruesas se usan para aumentar la aireación de los materiales más finos.

En el caso de las partículas de 1 mm, el tamaño de poros fue entre 50 y 200 μm (80%) con 67.3% de poros inter partícula, factores que proporcionaron valores intermedios de AFD (22.4%), ADD (33.2%) y AR (11.3%) (Cuadro 26). Los poros menores de 100 μm almacenan el agua y los mayores la percolan siempre y cuando se presenten poros inter partícula (Brady y Weil, 1999). Estos resultados no concuerdan con los encontrados en este estudio, ya que los poros intra partícula modifican la CA y la disponibilidad de agua.

Landis *et al.* (1990) señalaron que la perlita posee muchas características útiles que la hacen deseable como sustrato. Una de ellas es su estructura de celdas bien cerradas en donde el agua se adhiere en la superficie de las partículas y por tanto se presenta un buen drenaje, además de su peso ligero, es decir las partículas de perlita retienen menos humedad, y por tanto proveen más aireación que las partículas de piedra pómez del mismo tamaño (Jonson y Olhoeft, 1984). Debido a tales propiedades, la perlita frecuentemente es agregada al sustrato para aumentar la CA.

La CA mostró una alta correlación con el tamaño de las partículas ($r^2 = 0.7945$) (Figura 40).

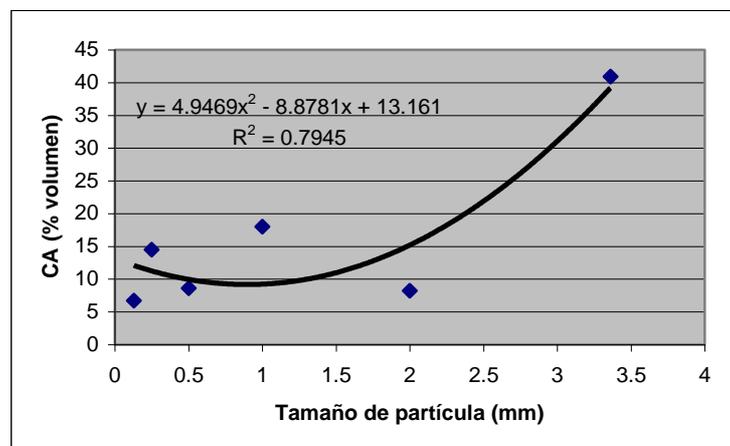


Figura 40. Relación entre la capacidad de aireación y tamaño de partícula en perlita.

f. Curva de liberación de agua

Los resultados de la curva de liberación de agua se muestran en la Figura 41, en esta figura se puede observar que el tamaño de partícula influye en la liberación de agua.

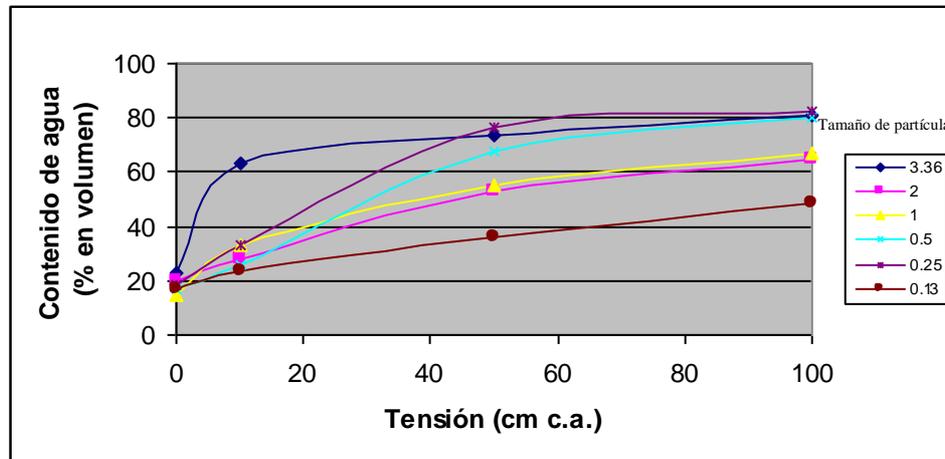


Figura 41. Curva de liberación de agua para perlitita en diferentes tamaños de partícula.

5.7 Piedra pómez

La piedra pómez conocida también como pumita o pumicita; es un material que se ha estudiado poco en México y tiene un alto potencial para ser usado, debido a su bajo costo y características de aireación y retención de humedad. Es un mineral de origen volcánico (piroclastos), poroso, que se constituye de vidrio en forma de espuma; se origina durante el enfriamiento muy rápido del magma ascendente de alta viscosidad; característicos de las vulcanitas claras y ácidas, como la riolita, y por ello son de color blanco grisáceo hasta amarillento, raramente de color pardo o gris (Daniel y Hammer, 1992). La ceniza volcánica y la pómez se clasifican en “Tefra”, nombre que indica acumulaciones de piroclastos (Fisher y Schminke, 1984); sin embargo se tienen nombres específicos de acuerdo con su tamaño, como: bombas (mayores de 6 mm), lapillis (2 y 6 mm) y cenizas (menores de 2 mm) (Pape y Lagger, 1994); estas partículas pueden ser de composición basáltica, andesítica, dacítica o riolítica (Wada y Harward, 1974).

Es un material altamente vesicular, presenta una textura porosa, esponjosa o espumosa, es escoriácea, con muchos huecos y cavidades, producidos por el escape de gases desde el centro; por su enfriamiento posee formas variadas, predominando las alargadas y angulosas (De Paepe, 1991).

La piedra pómez está compuesta de trióxido de sílice y trióxido de aluminio, entre otros componentes (71% de SiO₂, 12.8% de Al₂O₃, 1.75% de Fe₂O₃, 1.36% de CaO, 3.23% de Na₂O, 3.83% de K₂, 3.88% de H₂O). Los minerales de la pómez se cristalizan rápidamente, por lo cual presentan un patrón de difracción de rayos X de rango corto y tienen una alta susceptibilidad al intemperismo (Boul *et al.*, 1989).

5.7.1 Análisis micromorfológico

5.7.1.1 Porosidad

a. Tipo de poros

El análisis micromorfológico de la piedra pómez mostró que las partículas forman poros de empaquetamiento simple, vesículas externas e internas en la matriz del material (Figura 42a-f).

Los poros de empaquetamiento simple se presentaron entre granos simples y no son de origen biológico (Figura 42a). Estos poros se caracterizan porque van de equidimensionales a alargados, son interconectados y continuos (Bullock *et al.* 1985).

Los depósitos de piedra pómez son caracterizados por la naturaleza vesicular de las partículas; cada partícula contiene una densa red de finos orificios, algunos de los cuales pueden ser interconectados y abiertos a la superficie y otros aislados dentro de las partículas (Wesley, 2001). Su origen volcánico le proporciona una gran cantidad de poros (huecos y cavidades) que le confieren una baja densidad (absorbe y retiene agua), por lo que puede flotar sobre el agua a causa del aire contenido en sus cavidades y células cerradas, dando como resultado una mayor porosidad y solidez de las partículas (dureza media) (De Paepe, 1991).

De acuerdo con la literatura, los poros vesiculares se originan por el atrapamiento de CO₂ ó O₂, son discontinuos (no conectados) y permanentes, por lo que no están relacionados con el movimiento del agua. En el caso de los poros vesiculares de la pómez, se forman por el atrapamiento de gases y vapor de agua, lo que le da una apariencia tubular (De Paepe, 1991). Según Pape y Lagger (1994), estos poros no son continuos, sin embargo, se ha demostrado que los poros están interconectados y que participan en el almacenamiento de agua (Wesley, 2001; Formenti, 2003; Segura, 2003;).

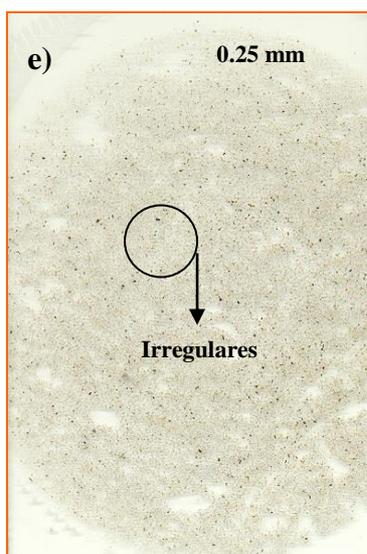
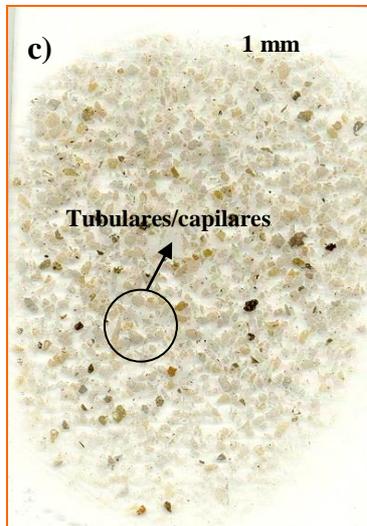
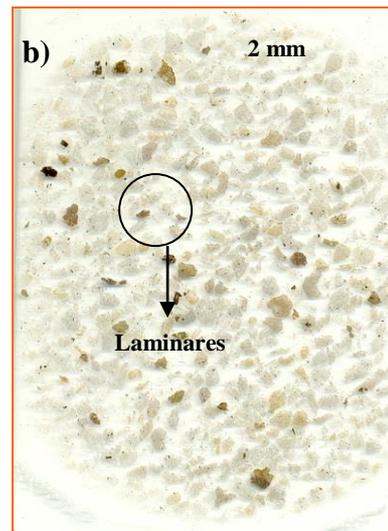
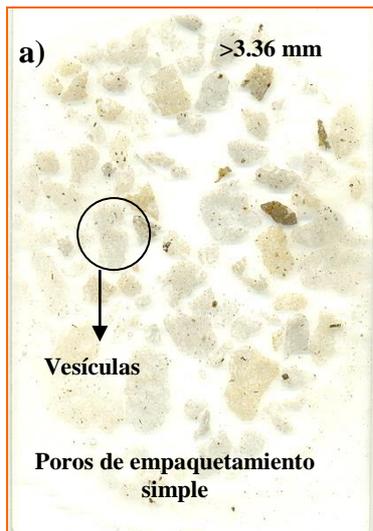


Figura 42. Secciones delgadas de piedra pómez en diferentes tamaños de partículas (dimensión de la sección delgada 5 x 7.5 cm).

b. Tamaño de poros

En la piedra pómez hay macroporos (0.01 a 1 mm) y mesoporos (0.05 a 0.01mm) inter partícula (fuera de las partículas) y microporos (menores de 0.05 mm) intra partícula (dentro de las partículas) (Figura 43 a-d).

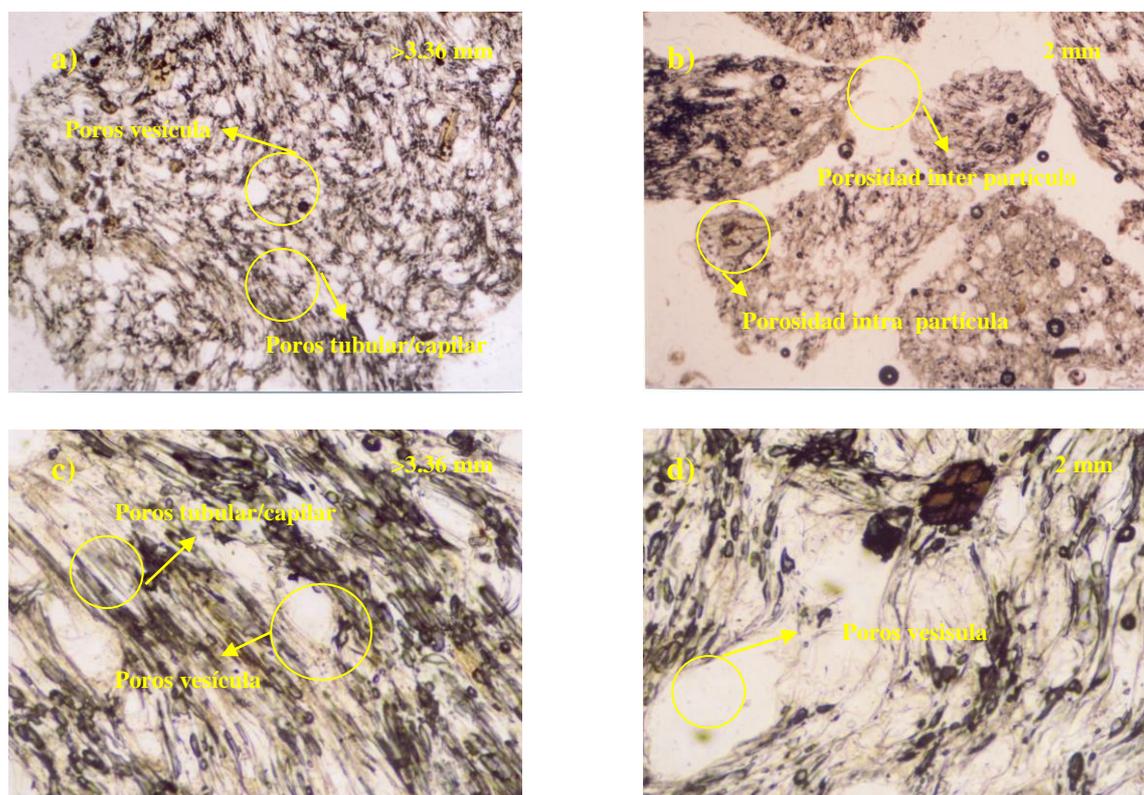


Figura 43. Piedra pómez: a) forma de poros, b) porosidad inter e intra agregado (longitud del marco 5.3 mm) LPP, c-d) forma de poros (longitud del marco 1 mm LPP).

c. Ubicación de los poros (inter e intra)

Los poros inter e intra partícula presentaron variaciones dependiendo del tamaño de las mismas y se observó una tendencia lineal; es decir, a medida que disminuye el tamaño de partícula lo hace la porosidad intra partícula y aumenta la inter partícula. (Cuadro 27). Los resultados mostraron que el mayor porcentaje de poros inter partícula se presentó en tamaños menores de 0.13 mm (95%) y menor porosidad intra partícula (5%); al contrario de las partículas mayores a 3.36 mm, las cuales presentaron el menor porcentaje de poros inter partícula (41.7%) y la mayor cantidad de poros intra partícula (58.3%) (Cuadro 27). De acuerdo con la función del tamaño de los poros se esperaría que las partículas mayores

tuvieran una mayor percolación y menor capacidad para almacenar el agua, sin embargo, esto ocurrió solo en partículas de 0.25 mm de diámetro.

La proporción de poros podría ser una medida del estado del empaquetamiento de las partículas. La capacidad de determinar el volumen de los poros inter partícula y las medidas de gravitación específica pueden presentar un cambio en la distribución del agua, la cual no entra en los espacios porosos internos de las partículas. Con el grosor de los materiales la penetración del agua podría ser muy poca, ya que la proporción de la porosidad (espacio interno) sería aislada y grande. Cuando el tamaño de partícula es pequeña, la proporción de poros internos podría decrecer y la penetración de agua incrementarse; muchas partículas finas contienen poros internos en los cuales el agua de riego no puede penetrar, por lo tanto la porosidad interna no siempre se encuentra interconectada (Wesley, 2001).

Cuadro 27. Propiedades micromorfológicas en diferentes tamaños de partícula en piedra pómez.

Descripción		Tamaño de partícula (mm)					
		<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Orden (%)	<i>Inter partícula</i>	95	81.7	64.2	52.8	48.3	41.7
	<i>Intra partícula</i>	5	18.3	35.8	47.2	51.7	58.3
Poros (%)	<i>P. E. Simple¹</i>	92	81.7	64.2	52.8	48.3	41.7
	<i>P. E. Compuesto</i>						
	<i>P. E. Complejo</i>						
	<i>Vesícula</i>	8	5.3	5	7.2	9.2	3.9
	<i>Fisuras</i>		13	30.8	40	42.5	54.4
Forma (%)	<i>Vesícula</i>		5.3	5	7.2	9.2	3.9
	<i>Tubular/Capilar</i>	8	81.7	30.8	40	42.5	54.4
	<i>Fibrosa</i>						
	<i>Irregular</i>	92	13	64.2	52.8	48.3	41.7
	<i>Acicular</i>						
	<i>Laminar</i>						
	<i>Fisuras</i>						

¹P. E. = Poros de empaquetamiento.

La piedra pómez aparentemente muestra una considerable variación en los estudios realizados de materiales similares. No todas las vesículas internas están interconectadas (Wesley, 2001), lo cual se contrapone con Whitham y Sparks (1986) que mencionaron que

todos los poros en la pómez estaban interconectados. Cecconi y Viggiani (1998) describieron rocas piroclásticas de Italia y caracterizaron la porosidad inter e intra partícula, mencionando que la porosidad intra partícula de las rocas piroclásticas es generalmente muy pequeña.

d. Forma y frecuencia de los poros intra

Los poros intra partícula fueron de tipo irregular, tubular/capilar, conectados y también se observaron poros vesiculares, los cuales no se encontraron conectados (Cuadro 27 y Figura 43a-d). Estos tipos de poros presentaron una frecuencia dependiendo del tamaño de partícula; por ejemplo, en partículas mayores de 0.25 mm ocurren los tres tipos de formas, mientras que en partículas menores que 0.13 mm dominaron los poros irregulares (92%); finalmente, se encontraron en menor cantidad, poros de tipo tubular/capilar.

Los piroclastos contienen dos tipos de vesículas: unas que se encuentran a lo largo y son interconectadas, y otras que son pequeñas poblaciones de vesículas que están aisladas. La piedra pómez retiene gas después del enfriamiento y deposición formando estas vesículas aisladas, las cuales se originan debido a la pérdida de gas. Cuando estas se unen a largas vesículas se conectan a la atmósfera del ambiente o bien pueden conectarse por el atrapamiento del gas durante el enfriamiento de la piedra pómez (Formenti, 2003).

e. Diámetro de poros

De acuerdo con la distancia que hay entre las partículas se observó que dominan los diámetros entre 0 y 500 μm (Cuadro 28). En partículas mayores de 3.36 mm se encontró una mayor variedad de distancias entre partículas, se observaron poros entre 100 y 1000 μm , mientras que las partículas más pequeñas menores de 1 mm y con más homogeneidad de formas presentaron poros entre 0 y 300 μm .

Segura (2003) mencionó que en las gravas de pómez predominan los poros de 25 μm (70%), los cuales pueden estar actuando como fuerzas capilares en la disponibilidad del agua.

Cuadro 28. Porcentaje de ocurrencia del diámetro de poros en piedra pómez.

Tamaño de partícula (mm)	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Diámetro de poro (μm)	Ocurrencia (%)					
0-50	83.3	53.3	20	6.7		
50-100	16.7	46.7	56.7	16.7	6.7	
100-200			23.3	73.3	83.3	60
200-300				3.3	10	10
300-500						13.3
500-700						10
700-1000						6.7
> 1000						

5.7.1.2 Partículas

a. Forma

La piedra pómez se caracterizó por presentar cinco diferentes tipos de formas: subredonda-ondulada-lisa, subangular-ondulada-lisa, subredonda-subangular-ondulada, lisa-subredonda y subredonda-ondulada. En poros vesiculares se observaron seis formas: redonda-lisa, subredonda-lisa-ondulada, subredonda-lisa, subredonda-ondulada, redonda-lisa, subredonda-ondulada, y finalmente, los poros tubulares y capilares se encontraron cuatro formas: redonda-lisa, subredonda-ondulada, rectas redonda-lisa-ondulada y rectas subredonda-lisa (Figura 44), todas estas formas varían con el tamaño de partícula.

De acuerdo con Segura (2003), las partículas de piedra pómez poseen diversas formas predominando las alargadas y las angulosas, mientras que las gravas de pómez son más redondeadas y presentan poros tipo vesículas de diferentes diámetros. Stanley (1978) y Formenti (2003) reportaron formas que van desde angulares a subangulares y de redondas a subredondas.

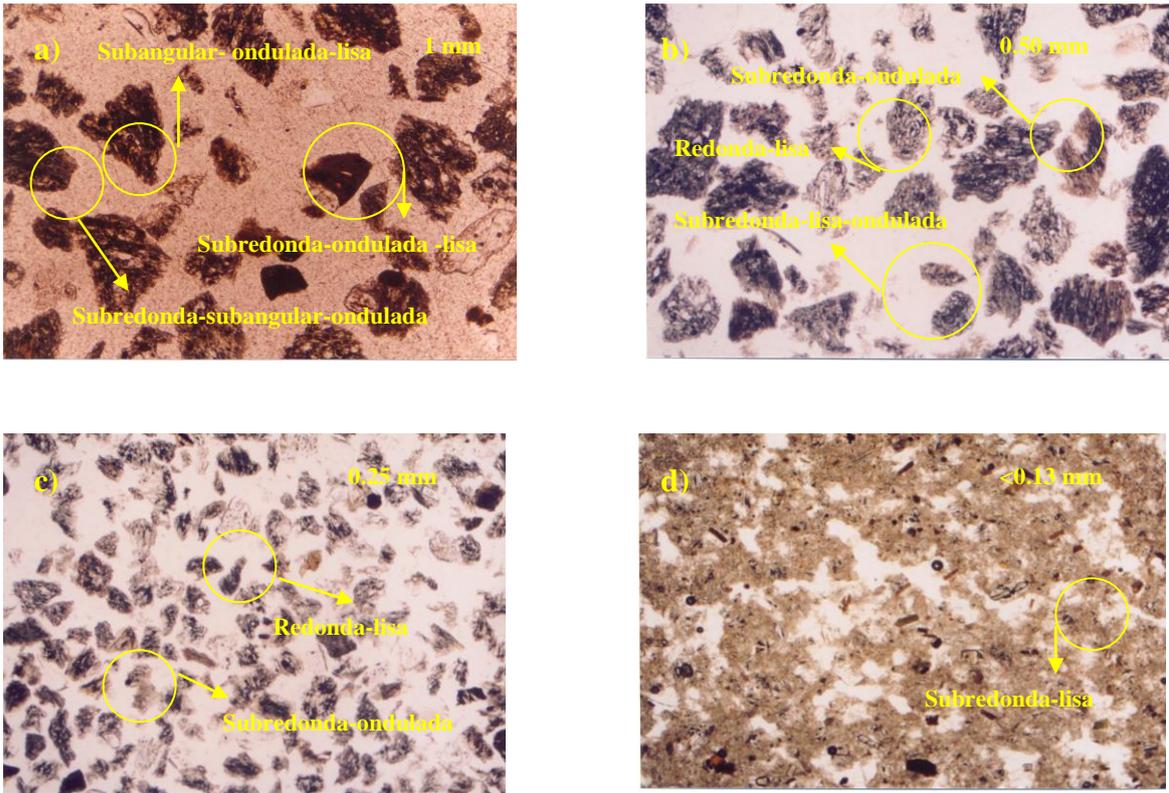


Figura 44. Formas de partículas en piedra pómez (longitud del marco 5.3 mm LLP).

5.7.2 Propiedades físicas

a. Tamaño de las partículas

Los resultados del tamaño de partícula en piedra pómez se muestran en el histograma de frecuencias de la Figura 45; se observó una mayor dominancia de partículas mayores de 1 mm (92.2%).

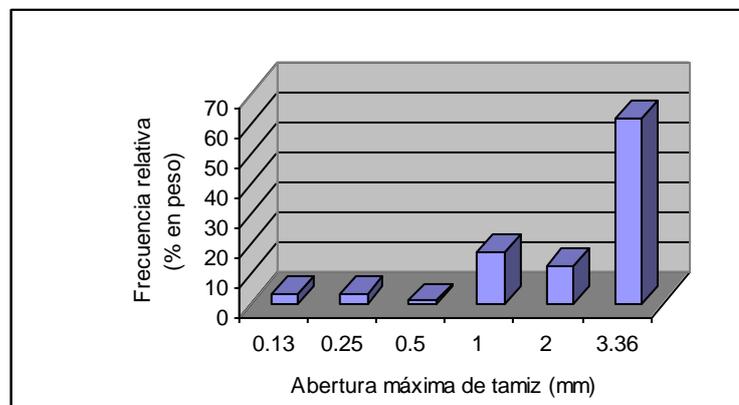


Figura 45. Histograma de frecuencias para la distribución granulométrica en piedra pómez.

b. Densidad aparente (DA)

El comportamiento de los valores de DA son irregulares y significativos y oscilan entre 0.64 y 1.06 g cm⁻³ (Cuadro 29); no obstante, se pueden reagrupar, ya que en las partículas mayores de 0.25 mm la densidad aparente es prácticamente constante; mientras que en partículas menores que 0.13 mm se presentó un incremento importante hasta 1.06 g cm⁻³. Estos resultados pueden explicarse a través de la forma que tienen las partículas menores que 0.13 mm, donde domina la forma subredonda con superficie lisa, provocando el empaquetamiento más cerrado y la disminución del espacio poroso (Figura 44); también se puede explicar a través de la disminución de poros intra partícula (5%).

La DA fue más baja, en comparación con el tezontle (0.82-1.43 g cm⁻³), lo que significa que hay un alto porcentaje de poros, sobre todo por la presencia de poros internos. Gunnlaugsson (1995) reportó una DA de 0.4 g cm⁻³. De Paepe (1991) mencionó que la porosidad que presenta la piedra pómez se debe a la cantidad de poros que tiene, proporcionándole una baja densidad de 0.4 a 0.9 g cm⁻³. Sin embargo, hay grandes diferencias en la DA de las partículas de tezontle y la pómez y puede especularse que depende de la magnitud de la trituración de muestras y en la cantidad de vesículas interconectadas dentro de estos materiales. La literatura sugiere que las vesículas en tezontle y pómez están interconectadas por delgados poros (Whitham y Sparks, 1986; Klug *et al.*, 2002; Fomenti y Druitt, 2003).

Cuadro 29. Densidad aparente y real en diferentes tamaños de partícula en piedra pómez.

Densidad (g cm ⁻³)	Tamaño de partícula (mm)					
	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Aparente	1.06 a ¹	0.64 b	0.64 b	0.68 b	0.68 b	0.71 b
Real	2.32 a	2.30 a	2.03 b	1.90 c	1.90 c	1.60 d

¹Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes dentro de cada hilera (Tukey, p<0.05).

Cabe señalar, que en la práctica, un incremento de 0.4 unidades implica un cambio drástico en el comportamiento de las partículas y en su manejo; por ejemplo un suelo de 1 g cm⁻³ es más suelto que un suelo de 1.4 g cm⁻³; que es clasificado como suelo pesado (Brady y Weil, 1999).

c. Densidad real (DR)

Los resultados mostraron que la piedra pómez presentó una DR variable (Cuadro 29) y estadísticamente significativa con un comportamiento lineal y una r^2 de 0.8746 (Figura 46). Esto se puede atribuir a la forma de las partículas; por ejemplo, partículas mayores de 2 mm se presentaron diversas formas, originando una mayor cantidad de espacios vacíos; mientras que en partículas menores de 0.13 mm sólo se presentó una forma de partículas, lo que permitió una mayor compactación, por lo que es probable que la DR debe estar cercana a 2.3 g cm^{-3} . Al tener mayor variedad de formas (Figura 42a-f), las partículas tienen un acomodamiento suelto, lo cual genera espacios vacíos; mientras que cuando las partículas tienen una forma homogénea, la compactación es mucho mayor. Drees *et al.* (1989) reportaron una DRI de 2.1 g cm^{-3} y una DA de 0.9 g cm^{-3} para la piedra pómez.

El tener una DR diferente significativa en las diferentes partículas puede implicar un problema metodológico; es decir, que el método utilizado (picnómetro) no es el más recomendable para este tipo de materiales.

De hecho, la piedra pómez y el tezontle contienen numerosas vesículas interconectadas por delgados poros, lo que sugiere que estos materiales tienen una alta dificultad para saturarse con agua mediante técnicas convencionales, por lo que posiblemente el método del picnómetro no sea el adecuado para determinar la densidad en las partículas (Tamari *et al.*, 2005). Como una explicación, Smith (1943) mencionó que la burbuja de gas atrapada en los poros de geometría compleja no es fácilmente removida por el calor, lo cual fue verificado por Wesley (2001) quien comparó diversas técnicas de saturación en partículas de pómez y obtuvo diferentes valores de densidad con el picnómetro. La idea de que el tezontle y la piedra pómez tienen dificultad para saturarse con agua, es soportada por el hecho de que a menudo las partículas de piedra pómez, en contacto con el agua se hunden después de cierto tiempo aunque floten en un inicio.

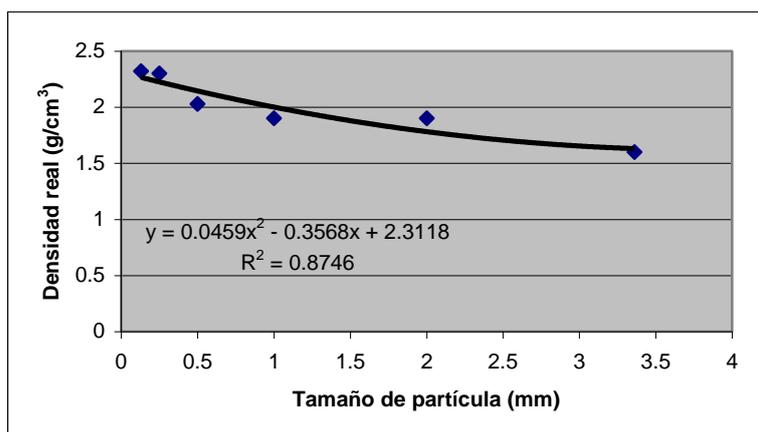


Figura 46. Relación entre densidad real y el tamaño de partícula en piedra pómez.

d. Espacio poroso total (EPT)

Los porcentajes de EPT en la piedra pómez fueron variables y significativos dependiendo del tamaño de partícula. La mayor porosidad total se presentó en partículas de 0.25 mm de diámetro, con 72.17% (Cuadro 30), debido a que las partículas generaron mesoporos o cavidades, lo cual puede estar en función al tamaño, forma y el arreglo de las partículas individuales de la piedra pómez. También la compresibilidad de las partículas, juega un papel importante, ya que provoca una disminución de la porosidad interna ocupada por el aire y el aumento de la retención de agua.

Cuadro 30. Porosidad y retención de agua en diferentes tamaños de partícula en piedra pómez.

Porosidad y retención de agua (% volumen)	Tamaño de partícula (mm)					
	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
EPT ²	54.31 c ¹	72.17 a	68.47 ba	64.21 b	64.21 b	55.63 c
CA	5.4 e	15.4 d	35.1 ba	36.2 a	33.3 b	21.5 c
AFD	4.9 c	42.4 a	16.3 b	4.3 c	4.5 c	2.0 d
AR	4.6 a	3.0 bc	2.3 c	3.4 bc	2.7 c	3.7 ba
ADD	39.4 a	11.4 d	14.7d	20.3 c	23.8 b	28.3 b
MS	45.69 a	27.83 c	31.53 cb	35.79 b	35.79 b	44.38 a

¹Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes dentro de cada columna (Tukey, p < 0.05).

²EPT = Espacio poroso total, CA = Capacidad de aireación, AFD = Agua fácilmente disponible, AR = Agua de reserva, ADD = Agua difícilmente disponible y MS = Material sólido.

e. Retención de agua

El comportamiento de las partículas de la piedra pómez en cuanto a la capacidad de aireación y retención de agua (fácilmente disponible, de reserva, o difícilmente disponible) (Cuadro 30) es diferente dependiendo del tamaño, forma y distancia de las partículas.

Las partículas mayores de 3.36 mm (tamaño de grava) no presentaron la mayor CA (21.5%) como se esperaba, esta se presentó en partículas de 1 mm (tamaño de arena) con 36.2% y las de menor capacidad fueron las partículas menores de 0.13 mm (5.4%). Al comparar estos valores con el tipo y la distancia del poro se encontró que en las partículas menores de 0.13 mm dominaron poros de 0 a 50 μm (83.3%) y poros inter partícula (95%) características que no permiten la percolación, reservando el agua (fuerzas de adhesión). Mientras que en las partículas mayores que 3.36 mm (con 41.7 % de poros inter partícula con tamaños entre 100 y 1000 μm) se esperaba una mayor percolación (AFD 2%), ya que el agua se retiene con mayor fuerza debido a la capilaridad, sin embargo, no ocurrió (CA de 21.5%). Una explicación, se puede encontrar a través del número de poros intra partícula (58.3%) que son los que retienen humedad. Esta agua es almacenada generando valores intermedios de AR (3.7%) y ADD (28.3%).

La permeabilidad intra partícula, es uno de los factores más importante. Smith y Smith (1985) realizaron un estudio con diferentes tamaños de partícula y mencionaron que el tiempo que tardan en humedecerse completamente es diferente. Por ejemplo, reportó que las partículas de 1 mm se humedecen inmediatamente, las de tamaños entre 1 y 4 mm tardan horas y partículas mayores de 4 mm dos semanas, lo cual se debe a un incremento de las fuerzas ascensionales con relación al aumento del tamaño de la partícula. Es probable que las vesículas internas no sean llenadas con agua inmediatamente debido a la impermeabilidad.

En el caso de las partículas de 1 mm, el tamaño de poros fue entre 50 y 200 μm (90%) con 47.2% de poros intra partícula, lo cual impide el drenaje del agua reteniéndola fuertemente (20.3%) (Cuadro 30). El tamaño de partículas de 0.25 mm mostró la mayor cantidad de AFD (42.4%) y la menor cantidad de ADD (11.4%), lo cual se debe a una disminución considerable de los poros intra partícula (Cuadro 30), y a la formación de mesoporos o cavidades entre 100 y 200 μm . Se ha reportado, que los poros menores de 100 μm almacenan al agua y los mayores la percolan siempre y cuando se presenten poros

inter partícula, porque nunca se refieren a poros intra partícula; los poros intra partícula pueden modificar la capacidad de aireación y almacenamiento de agua haciéndola difícilmente disponible, debido al acomodamiento y forma de las partículas. Las partículas menores de 0.13 mm presentaron el menor valor de CA (5.4%) y la mayor cantidad de AR (4.6%) y ADD (39.4%).

La piedra pómez es la responsable de la retención de humedad al presentar poros vesícula interconectados de tamaño capilar, que permiten el almacenamiento del agua y evitan que se pierda rápidamente por evaporación; sin embargo, las partículas tamaño lapilli son las que se saturan y conservan más humedad a diferencia de las cenizas y las bombas (Segura, 2003). Cabe señalar, que la pómez lapilli debe su tamaño, forma y densidad a la distribución del desarrollo de vesículas, durante la interrupción explosiva del magma parental (Smith y Smith, 1985).

Smith y Smith (1985) y Segura (2003) demostraron que el agua penetra y ocupa el espacio poroso de la pómez conforme transcurre el tiempo. Segura (2003) observó que después de un mes de saturación, la pómez estaba totalmente impregnada con agua; lo cual significa que el proceso de humedecimiento es muy lento y existe una interconexión entre los poros capilares, permitiendo que este material se comporte como una esponja rígida (Daniel y Hammer, 1992). Cuando la pómez no estaba alterada, las moléculas de agua que ocupan el espacio poroso, establecen interacciones físicas (adhesión, cohesión y tensión superficial) con las paredes de los poros, lo que provoca que la humedad se evapore paulatinamente. El agua dentro del poro conforma un microsistema en equilibrio; es decir, al aumentar la temperatura, rápidamente pasa a formar vapor.

En el caso de la pómez alterada, el agua entra a los poros e inicia el proceso de hidrólisis; por lo cual los cationes y aniones se concentran en solución. Esto provoca que aumente el calor de vaporización (Q_{vap}) y disminuya la presión de vapor (P_{vap}) del agua (Castellan, 1991), lo que trae como resultado que la evaporación sea lenta, al perderse paulatinamente el agua, ya que existe una interacción de tipo electroestático con las moléculas del agua.

Summer *et al.* (2000) indicaron que la reducción de las constantes de humedad ocurren al existir una relación entre el tamaño de partículas y el número de poros, es decir,

en las partículas de tamaño mayor de 11.5 mm el numero de poros es muy alto, pero también es mayor el tiempo que necesitan para saturarse, mientras que en las partículas pequeñas (0.25 a 0.45 mm), el número de poros disminuye y se comportan como partícula “parecida” a la arena con una superficie específica baja.

Gunnlaugsson (1995) reportó que las medidas de retención de humedad muestran que la pómez tiene una baja porción de agua fácilmente disponible comparada con el tezontle, especialmente cuando el tamaño de partícula se incrementa.

f. Curva de liberación de agua

Es importante que los sustratos presenten una elevada porosidad y capacidad de retención de agua, asociado con un drenaje rápido y buena aireación, que le permitan cumplir correctamente las funciones de regulación en el suministro de agua y aire (Milks *et al.*, 1989). Los resultados de la curva de liberación de agua se muestran en la Figura 47, en ésta figura se puede observar que el tamaño de partícula influye en la liberación de agua.

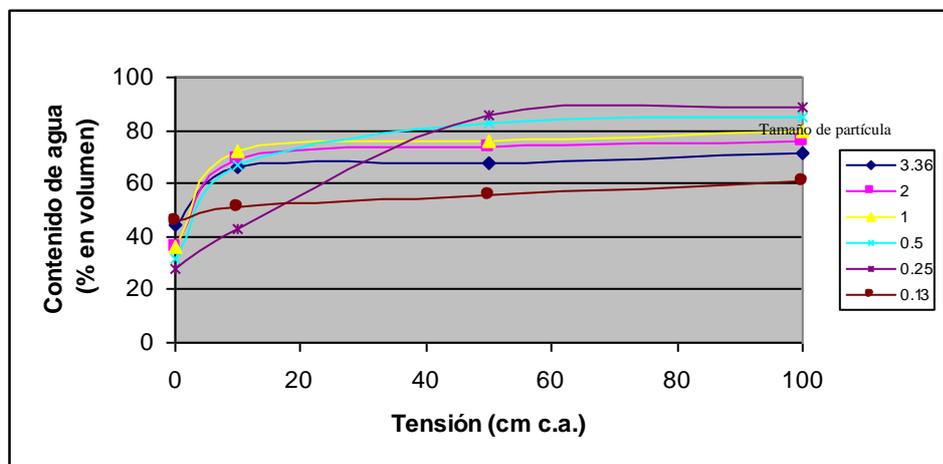


Figura 47. Curva de liberación de agua para piedra pómez en diferentes tamaños de partícula.

5.8 Zeolita

Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos hidratados de cationes alcalinos y alcalinotérreos que poseen una estructura tridimensional cristalina. Estos se caracterizan por su capacidad de hidratarse y deshidratarse en forma reversible, además, de cambiar algunos de sus constituyentes catiónicos, sin modificar su estructura (Ming y Mumpton, 1989); asimismo, tienen una superficie específica interna alta (cerca de $10^5 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$), lo que le permite almacenar cantidades importantes de agua (Boettinger y Ming, 2002).

De acuerdo, con el difractograma de difracción de rayos X realizado en el material, las zeolitas utilizadas en este estudio correspondieron a Faujasite (14.0, 3.78 y 2.88 nm), además de otros minerales, ya que los picos mostraron que no es zeolita pura (Figura 48).

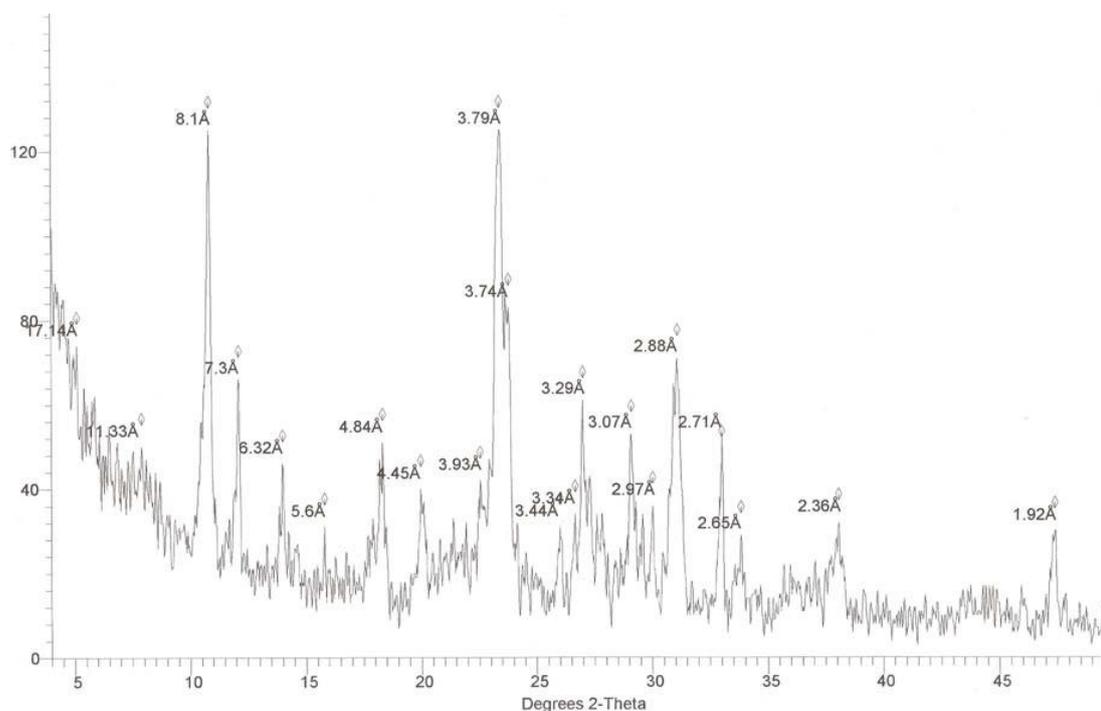


Figura 48. Difractograma correspondiente a zeolita.

Las zeolitas pueden atrapar una gran variedad de cationes (iones positivos) como: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y otros que pueden ser cambiados fácilmente en una solución de contacto.

La faujasita, tiene una estructura extraordinaria que se presenta en vesículas de rocas volcánicas $(\text{Na}_2,\text{Ca})\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$; compuesta de 192 cationes tetraedros y cada cubo octaedro truncado es ligado con seis anillos dobles, encerrando largas cavidades centrales, cuando la estructura de las unidades celulares son repetidas en tres dimensiones, las cavidades centrales se conectan de forma alargada (0.74 nm) (Figura 49) (Boettinger y Ming, 2002).

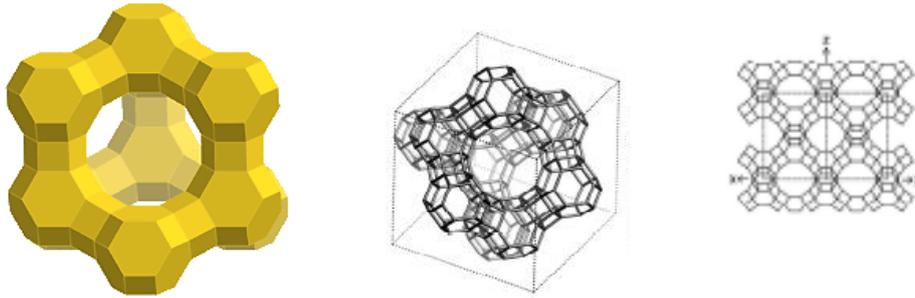


Figura 49. Estructura de zeolita tipo Faujasita.

5.8.1 Análisis micromorfológico

5.8.1.1 Porosidad

a. Tipo de poros

El análisis micromorfológico de la zeolita mostró que las partículas forman dos tipos de poros: de empaquetamiento simple (Figura 50a-f) y vesículas dentro de las partículas.

Los poros de empaquetamiento simple ocurren entre granos simples y no son de origen biológico (Bullock *et al.*, 1985); en tanto que las vesículas se forman por el gas atrapado, presentando alta permeabilidad (Pape y Lager, 1995) (Figura 50a-f).

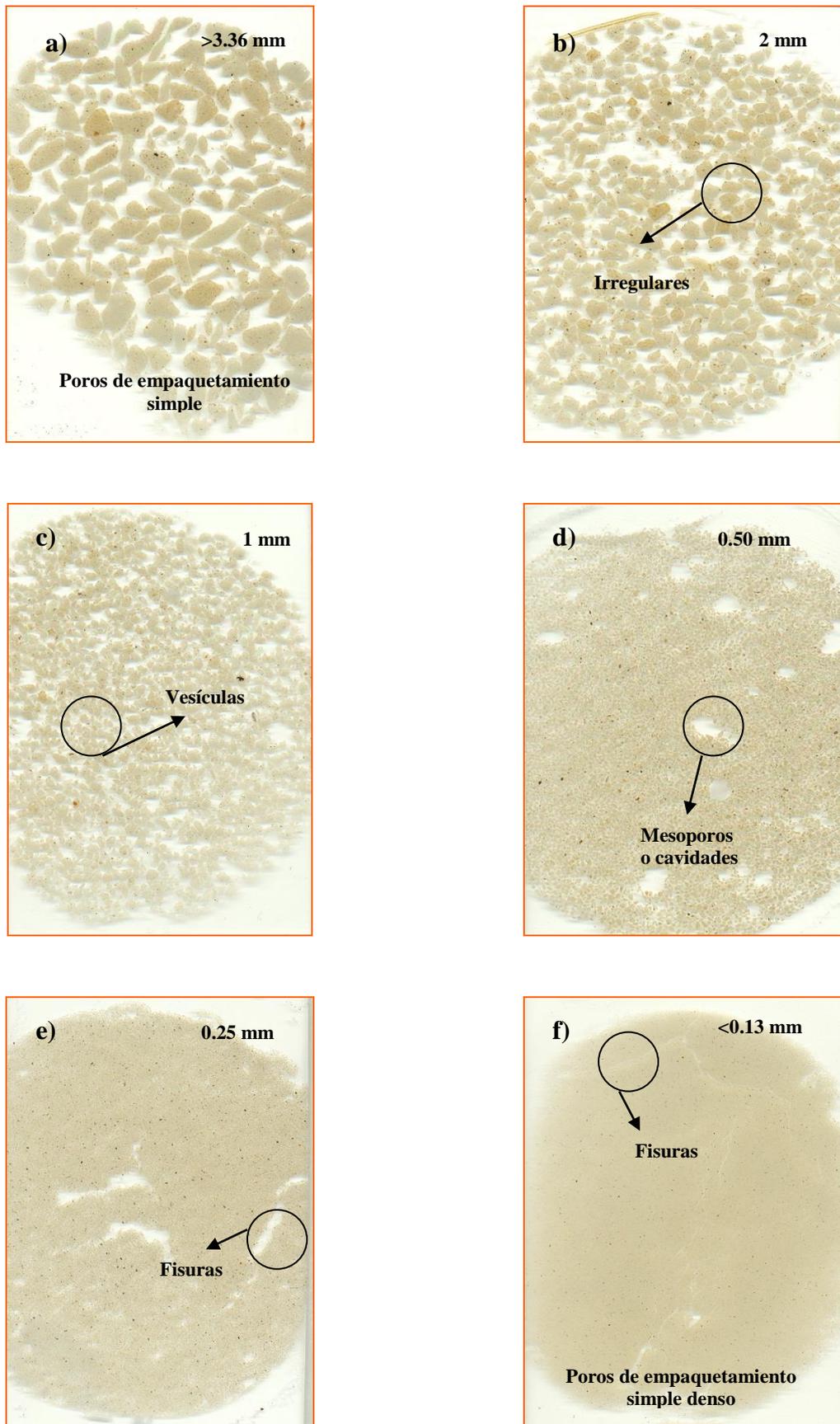


Figura 50. Secciones delgadas de zeolita en diferentes tamaños de partículas (dimensión de la sección delgada 5 x 7.5 cm).

La zeolita es un material inorgánico con un acomodamiento simple de las partículas, lo que generó vesículas en tamaños intermedios y en tamaños menores de 0.25 mm fisuras.

b. Tamaño de poros

La zeolita presentó macroporos (de 0.01 a 1 mm) y mesoporos (de 0.05 a 0.01 mm) entre las partículas y microporos (menores de 0.05 mm) dentro y fuera de las partículas. La Faujasite forma cavidades alargadas de 0.74 nm (Boettinger y Ming, 2002), donde se puede almacenar el agua. Ming y Mumpton (1989) mencionaron que una vez que el agua es removida el espacio vacío queda disponible dentro la estructura alargada para que entren otros cationes. Los canales que se forman tienen un tamaño de 0.8 a 1.0 nm de diámetro, lo que hace que su superficie específica interna sea considerable. Dentro de las cavidades se presenta el movimiento libre de numerosos cationes, moléculas y agua debido a la estructura de la zeolita; sin embargo, el tamaño de los canales es diferente dependiendo de la estructura de cada zeolita.

c. Ubicación de los poros (inter e intra)

Los poros inter e intra partícula varían con el tamaño de las mismas (Cuadro 31 y Figura 51a). El mayor porcentaje de poros inter agregado se presentó en partículas menores de 0.13 mm (100%), lo que significa una mayor compactación. En el caso, de las partículas de 2 mm ocurrió el menor porcentaje de poros inter (72.5%) con el mayor porcentaje de poros intra partícula (27.5%) (Figura 51b).

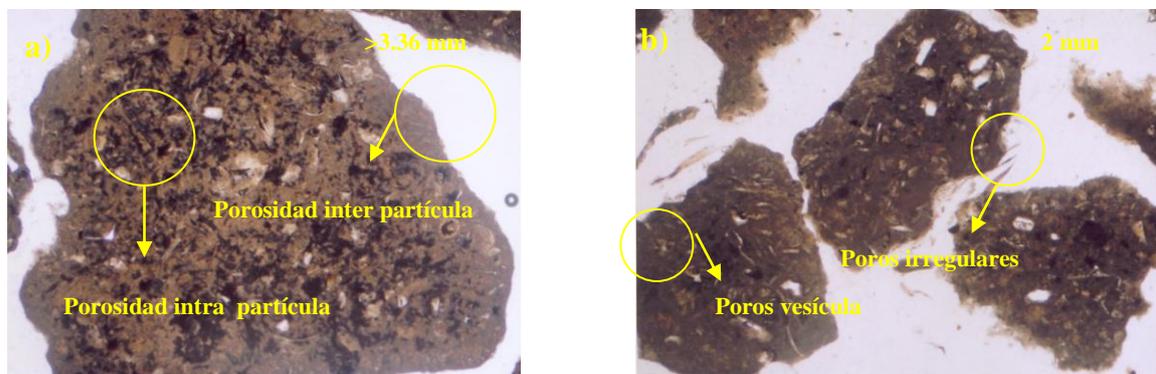


Figura 51. Zeolita: a) porosidad inter e intra partícula, b) forma de poros (longitud del marco 5.3 mm LPP).

Cuadro 31. Propiedades micromorfológicas en diferentes tamaños de partícula en zeolita.

Descripción		Tamaño de partícula (mm)					
		<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Orden (%)	<i>Inter partícula</i>	100	96	93	82	72.5	80.9
	<i>Intra partícula</i>		4	7	18	27.5	19.1
Poros (%)	<i>P. E. Simple¹</i>	95	100	93	82	72.5	80.9
	<i>P. E. Compuesto¹</i>						
	<i>P. E. Complejo</i>						
	<i>Vesícula</i>				6	19.2	10.9
	<i>Fisuras</i>	5			12	8.3	8.2
Forma (%)	<i>Vesícula</i>				6	19.2	10.9
	<i>Tubular/Capilar</i>		2	5	12	8.3	8.2
	<i>Fibrosa</i>						
	<i>Irregular</i>	95	98	95	82	72.5	80.9
	<i>Acicular</i>						
	<i>Laminar</i>						
	<i>Fisuras</i>	5					

¹P. E. = Poros de empaquetamiento.

d. Forma y frecuencia de los poros

Los poros de empaquetamiento simple fueron de tipo irregular, conectados y presentaron variaciones de acuerdo con el tamaño de partícula (Cuadro 31 y Figura 50a-f y 51a-b); también se presentaron poros de tipo vesiculares y fisuras. Boettinger y Ming (2002) mencionaron que las zeolitas ocurren de una alteración de productos secundarios en cavidades y vesículas de las rocas ígneas.

e. Diámetro de poros

De acuerdo con el tamaño de partícula, la distancia entre ellas se redujó linealmente; sin embargo, se pueden presentar variaciones por el tipo de formas. Las partículas mayores que 3.36 mm mostraron una mayor variedad de formas, por lo que el intervalo fue más amplio (entre 0 y 500 μm); mientras que las partículas más pequeñas, menores de 1 mm, con formas homogéneas, el intervalo fue menor (0 y 200 μm). Cabe indicar, que la formación de mesoporos o poros cavidad, en partículas de 1 y 0.50 mm (de 100 a 500 μm); y fisuras en partículas menores de 0.25 mm, la distancia entre partículas más frecuente fue entre 0 y 300 μm (Cuadro 32).

Cuadro 32. Porcentaje de ocurrencia del diámetro de poros en zeolita.

Tamaño de partícula (mm)	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Diámetro de poro(μm)	Ocurrencia (%)					
0-50	86.7	43.3	36.7	43.4	30	23.3
50-100	13.3	50	46.7	33.3	20	10
100-200		6.7	16.6	20	36.5	36.7
200-300				3.3	13.3	20
300-500						10
500-700						
700-1000						
> 1000						

Brady y Weil (1999) han reportado que las fisuras se generan como resultado de la pérdida de humedad en las partículas. Es probable, que el proceso este relacionado con el tamaño de partícula y el mayor contacto de los microporos estructurales con el medio. Este fenómeno no ocurre en las partículas grandes, donde el agua estructural se conserva debido a la menor superficie de exposición. Cuando las partículas pierden humedad, tienden a contraerse y formar las grietas, proceso común en las partículas arcillosas (Figura 50f y 52d).

5.8.1.2 Partículas

a. Forma

La zeolita presentó cuatro diferentes tipos de formas: angular-subangular-ondulada, angular-lisa-ondulada, subangular-rugosa, subredonda-ondulada; dos formas vesiculares: redonda-lisa, redonda-ondulada-lisa y las fisuras onduladas-redonda-alargada, redonda-alargada-lisa (Figura 52a-d), estas formas son diferentes de acuerdo con el tamaño de partícula. Boettinger y Ming (2002) mencionaron que la morfología de las zeolitas son usualmente cristales pequeños (<10 μm de diámetro).

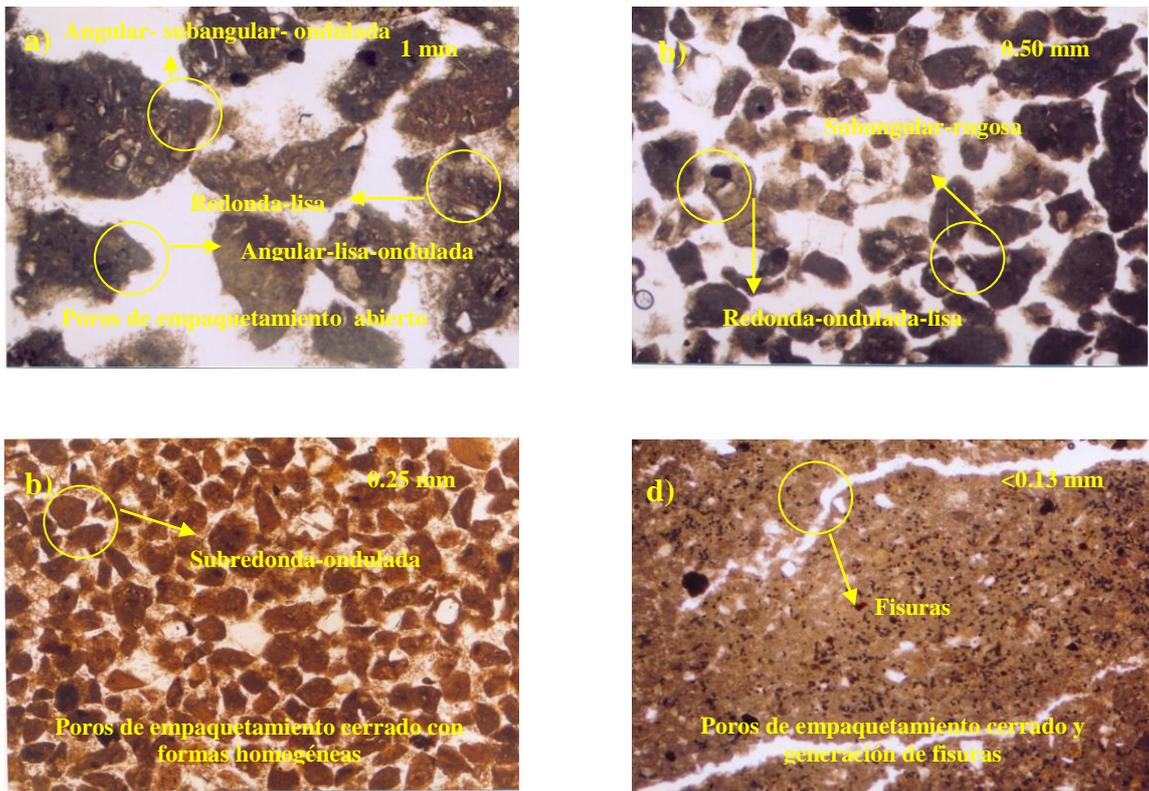


Figura 52. Formas de partículas en zeolita (las figuras a-c tienen una longitud del marco de 5.3 mm y d de 1 mm de LPP).

5.8.2 Propiedades físicas

a. Tamaño de las partículas

Los resultados del tamaño de partícula de zeolita se muestran en el histograma de frecuencias de la Figura 53; se observó que hay una mayor dominancia de partículas mayores que 2 mm (96.4%), el tamaño puede variar de acuerdo con la granulometría que se requiera y la procedencia del material.

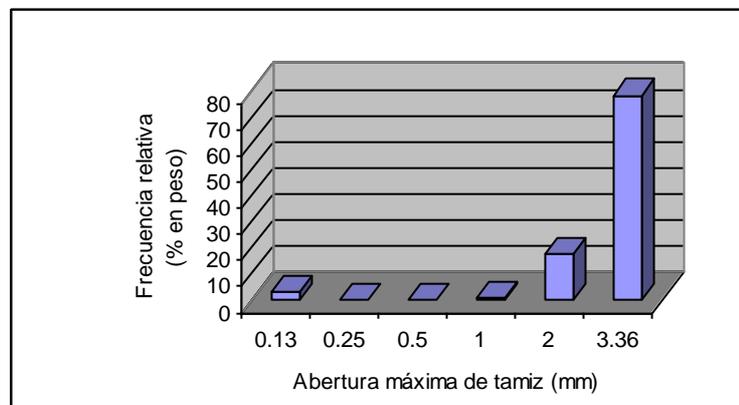


Figura 53. Histograma de frecuencias para la distribución granulométrica en zeolita.

b. Densidad aparente (DA)

El comportamiento de los valores de densidad aparente fueron irregulares y estadísticamente significativos, ya que el grado de compresión y el arreglo de partículas se ven afectados, dependiendo del tamaño de estas. La mayor densidad se observó en partículas menores de 0.13 mm (0.83 g cm^{-3}) y la menor en partículas de 0.25 mm (0.68 g cm^{-3}) (Cuadro 33).

Cuadro 33. Densidad aparente y real en diferentes tamaños de partícula en zeolita.

Densidad (g cm^{-3})	Tamaño de partícula (mm)					
	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
Aparente	0.83 a ¹	0.68 b	0.81 a	0.76 ba	0.75 ba	0.76 ba
Real	2.1 c	2.28 a	2.23 ba	2.24 ba	2.2 bc	2.22 ba

¹Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes dentro de cada hilera (Tukey, $p < 0.05$).

Ming y Mumpton (1989) y Boettinger y Ming (2002) mencionaron que la densidad es diferente dependiendo del tipo de zeolita que se tenga. En el caso de faujasite reportaron una densidad de 1.91 g m^{-3} . Esta DA es muy elevada si se le compara con la DA encontrada en el material zeolítico analizado; sin embargo, se debe indicar, que no se trató de una zeolita pura, ya que contenía otros minerales.

c. Densidad real (DR)

Los resultados mostraron que la zeolita presentó una DR variable y significativa (Cuadro 33). La mayor DR se observó en partículas de 0.25 mm (2.28 g cm^{-3}) y la menor en partículas menores de 0.13 mm (2.1 g cm^{-3}).

d. Espacio poroso total (EPT)

Los resultados de EPT en zeolita son variables y estadísticamente significativos, entre 60.48 y 70.18% (Cuadro 34), teniendo un comportamiento irregular de acuerdo con el tamaño de partícula.

El mayor EPT se presentó en partículas de 0.25 mm de diámetro con 70.18%, y la menor en tamaños menores de 0.13 mm (60.48%) (Cuadro 34); lo cual se puede atribuir,

al acomodamiento de las partículas que generaron poros de formas vesicular (27.5%) e irregular (72.5%).

Cuadro 34. Porosidad y retención de agua en diferentes tamaños de partícula en zeolita.

Porosidad y retención de agua (%volumen)	Tamaño de partícula (mm)					
	<0.13	0.25	0.50	1.0	2.0	>3.36
EPT ²	60.48 b ¹	70.18 a	63.68 b	66.07 ba	65.91 b	65.77 ba
CA	17.4 c	13.7 d	20.5 b	23.8 a	11.1a	12.7 d
AFD	7.8 cd	31.4 a	15.8 b	6.9 d	12.1 cb	5.2 d
AR	2.4 c	1.6 c	7.6 a	3.7 bc	0.8 c	6.6 ba
ADD	32.8 b	23.6 c	19.8 d	31.6 b	41.9 a	41.3 a
MS	39.52 a	29.82 b	36.32 a	33.93 ba	34.09 a	34.23 ba

¹Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes dentro de cada columna (Tukey, $p < 0.05$).

²EPT = Espacio poroso total, CA = Capacidad de aireación, AFD = Agua fácilmente disponible, AR = Agua de reserva, ADD = Agua difícilmente disponible y MS = Material sólido.

e. Retención de agua

El comportamiento de las partículas en zeolita en cuanto a la CA y retención de agua (fácilmente disponible, de reserva, o difícilmente disponible) es diferente dependiendo del tamaño, forma y distancia de las partículas y los valores fueron estadísticamente significativos.

En el Cuadro 34 se puede apreciar que las diferentes propiedades físicas varían con el tamaño de partícula. Por ejemplo, partículas de 1 mm presentaron una mayor capacidad de aireación (23.8%), mientras que las partículas de 2 mm tuvieron solo 11.1%. En cuanto a disponibilidad de agua, los resultados mostraron que el tamaño de partícula de 0.25 mm de zeolita fue la que presentó una mayor cantidad de AFD (31.4%) y uno de los menores valores para ADD (23.6%); mientras que en partículas mayores que 3.36 mm se mostró la menor cantidad de AFD (5.2%) y la mayor cantidad de ADD (41.9 %).

Cuando se compararon estos resultados con el tipo y la distancia de los poros (inter e intra partícula), la superficie específica (externa e interna) y las fuerzas de adhesión, se puede explicar este comportamiento irregular. En las partículas de 0.25 mm hay una mayor superficie específica externa que permite que las moléculas de agua se adhieran, aunque no con la suficiente fuerza (fácilmente extraíble), lo que provoca una contracción de

partículas (entre 0 y 100 μm) y formación de algunas fisuras. En el caso de las partículas más grandes (mayores de 3.36 mm), la superficie específica interna (estructural) es mayor, de ahí que el agua tienda más a almacenarse que a percolarse a pesar de la presencia de macroporos, es decir, cuando el agua entra tiene más superficie de contacto provocando mayor adherencia (ADD).

En el caso de las partículas de 1 mm (tamaño intermedio), su comportamiento en cuanto a la retención de humedad es también intermedio; tiene el mayor valor de CA (23.8%), pero también tiene un alto valor de ADD (31.6%). Una explicación a este comportamiento puede ser el tamaño homogéneo que se presentó en los poros (entre 0 y 200 μm) con 97.3%.

Oleksiy *et al.* (2006) indicaron que las zeolitas poseen ventajas en la estructura generando poros regulares, además, de la existencia de dos tipos de superficies: interna, inaccesible a largas moléculas y externa (cristalina), las cuales presentaron una eficiencia en el tamaño de los poros.

f. Curva de liberación de agua

Los resultados de la curva de liberación de agua se muestran en la Figura 54, en esta figura se puede observar que el tamaño de partícula influye en la liberación de agua.

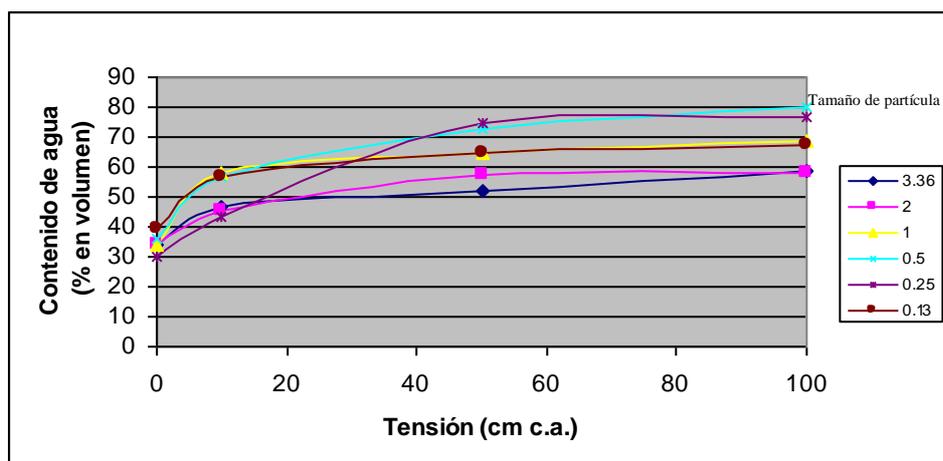


Figura 54. Curva de liberación de agua para zeolita en diferentes tamaños de partícula.

5.9 Selección de mezclas de sustratos

Las mezclas de sustratos se hacen con la finalidad de obtener las características adecuadas para el crecimiento de las plantas y pueden usarse tanto materiales orgánicos como inorgánicos (Baixauli y Aguilar, 2002).

En México, las mezclas de sustratos están formadas entre 50 y 70% de materiales orgánicos, especialmente peat moss, tierra de monte y corteza de pino, y el resto de otros materiales como: vermiculita, perlita o tezontle (Alarcón *et al.*, 2001). Las superficies dedicadas a la producción de plantas en maceta o contenedor presentan una amplia gama de posibilidades de cultivo; se pueden encontrar desde explotaciones al aire libre, hasta la disponibilidad de estructuras sofisticadas de protección; esta diversidad en los sistemas de producción, genera una gran variedad de materiales empleados como sustratos. Cabe señalar que, a nivel mundial, los sustratos que se emplean en mayor cantidad son los de origen orgánico y de los componentes más importantes y ampliamente utilizados, las turbas de *Sphagnum* ocupan el primer lugar (Raviv *et al.*, 1986; Pryce, 1991; Abad y Noguera, 1998).

Sin embargo, ante la dudosa disponibilidad en un futuro de la turba y debido a que son reservas no renovables e intervienen, como reservorios de CO₂ atmosférico (Abad y Noguera, 1998); se tienen que buscar nuevos materiales que puedan utilizarse como sustratos e inclusive aprovechar otros que se encuentren en la región. Se recomienda realizar un estudio detallado de las características de éstos, estudiando las ventajas y desventajas y teniendo claros los criterios que deberán considerarse en la elección de un sustrato.

Actualmente, las mezclas se generan por pruebas de ensayo-error (Chong *et al.*, 1994; Reis, 1995) y programación lineal (Pokorny, 1981; Pokorny *et al.*, 1986; Burés, 1988; Zamora, 2005). Sin embargo, durante la caracterización de los diferentes materiales, en la presente investigación, no todos los sustratos presentaron una tendencia lineal en cuanto al tamaño de partícula y las propiedades físicas (DA, DR, EPT, CA, AFD, AR, ADD y MS), lo cual es importante para la generación de mezclas. Las características que deben reunir los sustratos varían en función de las necesidades del material vegetal a utilizar (especie, variedad, si se trata de varias especies o de una sola), finalidad del cultivo (multiplicación, producción de planta, fruto, flor, entre otras), costos, propiedades (físicas,

micromorfológicas, químicas y biológicas), tecnología empleada (estructuras de protección del cultivo, sistemas de control de la solución nutritiva, sistemas de riego, etc.), factores climáticos y el impacto ambiental (Handreck y Black, 1991; Abad, 1995; Abad y Noguera, 1998; Abad *et al.*, 1999).

Los resultados mostraron que los sustratos con mejores características, tanto físicas como micromorfológicas fueron: la fibra de coco, el peat moss, el tezontle, la piedra pómez y la perlita en un tamaño de partícula intermedio (1 mm). Sin embargo, para el presente trabajo también se utilizó el tamaño de partícula de 3.36 mm y a granel, ya que son los tamaños usados comúnmente por los productores; generando diversas mezclas (Cuadro 35). Es importante mencionar que éstas deben tener una elevada porosidad y capacidad de retención de agua fácilmente disponible, drenaje rápido, buena aireación, distribución del tamaño de partículas, baja densidad aparente y alta estabilidad (Burés, 1999; Abad y Noguera, 1998; Ansorena, 1994; Abad *et al.*, 1993).

Cuadro 35. Tratamientos de las diferentes mezclas de sustratos.

Tratamientos	Sustrato	Tamaño de partícula (mm)	Proporción
M1T1 ¹	Fibra de coco + tezontle	Granel	60:40
M1T2	Fibra de coco + tezontle	3.36	60:40
MIT3	Fibra de coco + tezontle	1	60:40
M2T4	Fibra de coco + piedra pómez	Granel	60:40
M2T5	Fibra de coco + piedra pómez	3.36	60:40
M2T6	Fibra de coco + piedra pómez	1	60:40
M3T7	Fibra de coco + perlita	Granel	60:40
M3T8	Fibra de coco + perlita	3.36	60:40
M3T9	Fibra de coco + perlita	1	60:40
M4T10	Peat moss + tezontle	Granel	60:40
M4T11	Peat moss + tezontle	3.36	60:40
M4T12	Peat moss + tezontle	1	60:40
M5T13	Peat moss + piedra pómez	Granel	60:40
M5T14	Peat moss + piedra pómez	3.36	60:40
M5T15	Peat moss + piedra pómez	1	60:40
M6T16	Peat moss + perlita	Granel	60:40
M6T17	Peat moss + perlita	3.36	60:40
M6T18	Peat moss + perlita	1	60:40
M7T19	Peat moss + perlita	Granel	67:33
M8T20	Peat moss + vermicoposta + tezontle	Granel	35:20:45

¹M=Mezcla y T= Tratamiento.

5.9.1 Propiedades físicas de las mezclas de sustratos

Las propiedades de tipo físico resultan de enorme importancia para un eficiente desarrollo de la planta. Cabe señalar, que una vez colocada en el contenedor resulta

prácticamente imposible modificar las características iniciales (Raviv *et al.* 1986; Abad, 1995; Abad y Noguera, 1998).

a. Densidad aparente y real (DA y DR)

La DA juega un papel importante, ya que los sustratos se transportan durante su manejo y manipulación, y consecuentemente, el peso debe ser considerado; por otro lado, el anclaje de la planta también es un factor importante, ya que entre más alta sea la planta, mayor peso deberá tener el sustrato.

Al realizar el análisis de varianza se encontraron diferencias significativas en densidad aparente y real entre tratamientos (Cuadro 36). En el caso de la DA es diferente es diferente dependiendo de los materiales que integran las mezclas. Los mayores valores se observaron en los tratamientos M1T1, M1T2, M1T3, M4T10, M4T11 M412 y M8T20, con densidades entre 0.42 y 0.71 g cm⁻³, que correspondieron a materiales de fibra de coco y peat moss combinados con tezontle; mientras que los menores valores (de 0.09 a 0.18 g cm⁻³) se reportaron en los tratamientos M3T7, M3T8, M3T9, M6T16, M6T17, M6T18 y M7T19, para combinaciones de fibra de coco, peat moss y perlita, los cuales no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (Cuadro 36).

La DA en el caso de sustratos varía considerablemente de un material a otro, pero en un intervalo de valores muy inferior a los suelos (1-1.4 g cm⁻³), por ejemplo para peat moss se pueden encontrar valores de 0.05 a 0.15 g cm⁻³ (Pagés *et al.*, 1981), 0.2 g cm⁻³ para mantillo de hojas de pino (De Boodt, 1975), entre 0.2 y 0.25 g cm⁻³ para composta de corteza de pino (Pagés *et al.*, 1981) y valores de hasta 0.3 g cm⁻³ e incluso superiores, para otros sustratos (De Boodt y De Waele, 1968); por lo que los intervalos pueden oscilar entre 0.15 y 0.75 g cm⁻³ (Raviv *et al.* 1986; Handreck y Black, 1991).

Verdonck *et al.* (1978) consideraron que es necesario que la densidad aparente se determine de forma muy precisa, ya que una variación de 0.005 g cm⁻³ puede alcanzar diferencias en el contenido de humedad (mayor a 6%), sin olvidar que la densidad aparente también presenta variaciones a lo largo del sistema de producción e indica el cambio del volumen total de poros y su morfología, así como la velocidad de mineralización y humificación (De Boodt y Verdonck, 1971).

En el caso de la DR los valores fueron variables y estadísticamente significativos de 0.79 hasta 2.36 g cm⁻³ (Cuadro 36); los resultados se encontraron en los rangos recomendados por Abad *et al.* (1993) que reportaron densidades reales satisfactorias entre 1.45 y 2.65 g cm⁻³.

Cuadro 36. Densidad aparente y real en diferentes mezclas de sustratos.

Tratamientos	Densidad aparente (g cm ⁻³)	Densidad real (g cm ⁻³)
M1T1 ²	0.51 bc ¹	2.33 a
M1T2	0.53 b	2.32 a
MIT3	0.42 cde	2.36 a
M2T4	0.36 ef	1.43 h
M2T5	0.39 def	1.49 g
M2T6	0.38 ef	1.70 d
M3T7	0.18 g	1.15 k
M3T8	0.09 g	0.79 n
M3T9	0.13 g	1.08 l
M4T10	0.48 bcd	1.55 f
M4T11	0.42 cde	2.09 c
M4T12	0.42 cde	2.25 b
M5T13	0.35 ef	1.43 h
M5T14	0.30 f	1.47 gh
M5T15	0.37 ef	1.65 e
M6T16	0.17 g	1.26 i
M6T17	0.11 g	0.87 m
M6T18	0.13g	1.13 k
M7T19	0.15 g	1.20 j
M8T20	0.71 a	2.26 b

¹Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes dentro de cada columna (Tukey, p< 0.05).

²M = Mezcla y T = Tratamiento.

b. Porosidad y retención de agua

Las relaciones aire-agua en el sustrato son indispensables para la elaboración de mezclas más eficientes, que proporcionen a la planta CA y disponibilidad de agua. La distribución de fases (sólida líquida y gaseosa) en el sustrato, incluye los volúmenes de material sólido, aire y agua en diferentes condiciones de humedad (Fonteno *et al.*, 1981). El reparto del volumen total entre las fases está fuertemente condicionado por las relaciones hídricas en el sustrato y estrechamente vinculado con las características del

espacio poroso, como son la distribución del tamaño de poro, la forma de los poros y la comunicación de cada uno de ellos con el resto del espacio poroso.

En el Cuadro 37, se pueden observar los valores para la porosidad y retención de agua (CA, AFD, AR, ADD). Los resultados para el espacio poroso total (EPT) mostraron que todos los tratamientos tienen entre 68 y 89%, lo cual coincide con lo reportado (entre 60 y 85%) por De Boodt y Verdonck (1972); Bunt (1988); Handreck y Black (1991) y Abad *et al.* (1993); mientras que la mayor porosidad se presentó en los tratamientos M1T3, M3T7, M3T8, M3T9, M4T12, M6T16, M6T17, M6T18 y M7T19, con valores mayores de 80%, y la menor porosidad se observó en M4T10 y M8T20 (menos de 70%); estas diferencias dependen del tamaño, forma, distancia y distribución de las partículas. Cabe señalar, que el espacio poroso total no establece las características de un sustrato, ya que este puede tener una elevada porosidad total y tener poca retención de agua (Verdonck *et al.*, 1984). Por lo tanto, las características están determinadas por la CA, AFD, AR, ADD y MS y dependerán de los productos, proporciones y materiales usados en las mezclas.

Los resultados para la capacidad de aireación (CA) fueron estadísticamente significativos. La mayor CA se presentó en los tratamientos MIT1, M1T2, M1T3, M6T16, M6T18, con valores por arriba de 40% (Cuadro 37). En el caso de la CA los intervalos han ido modificándose a lo largo del tiempo, por ejemplo: De Boodt y Verdonck (1972) reportaron que variaron entre 20 y 30%; Bunt (1988) de 10 a 20%; Handreck y Black (1991) entre 7 y 50% y finalmente Abad *et al.* (1993) indicaron que deben oscilar entre 10 y 30%. La falta de un valor específico puede deberse a la dificultad para diferenciar la tolerancia de diversos cultivos a bajos niveles de aireación, así como a los métodos usados para la determinación de esta variable (Bunt, 1988). Es necesario mencionar, que el tamaño de partícula también influye en los resultados obtenidos, ya que los valores que corresponden a los tratamientos a granel (M2T4, M4T10, M5T13, M8T20) presentaron la menor CA (menor a 20%), debido a la combinación de diversos tamaños de éstas.

El agua fácilmente disponible (AFD) mostró resultados significativos entre tratamientos; los mayores valores (arriba de 30%) se observaron en los tratamientos M2T4, M2T6, M3T7, M3T8, M3T9, M4T10, M4T12, M5T13 y M6T17, especialmente en aquellos con tamaño de partícula de 1 mm; mientras que los menores correspondieron a los tratamientos M1T1 y M1T2 (menor a 20%). Los valores reportados en la literatura fueron

entre 20 y 30% (De Boodt y Verdonck, 1972; Handreck y Black, 1991; Abad, *et al.* 1993). Los mayores valores de agua de reserva (AR) se presentaron en los tratamientos M3T8, M4T10, M5T15, M6T17, M7T19 y M8T20 (mayor a 8%), mientras que los menores en M1T2, M1T3, M2T6, M4T11 y M6T16 (menor a 3%) (Cuadro 37). De Boodt y Verdonck, (1972) y Abad *et al.* (1993) mencionaron que para el AR el intervalo debe ser entre 4 y 10%. Finalmente, para el agua difícilmente disponible (ADD), los resultados mostraron diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes tratamientos, las mayores cantidades (arriba de 20%) se encontraron en los tratamientos M6T17 y M7T19 y las menores en M1T3, M2T4, M2T5, M2T6, M4T12, M5T13 y M5T14 (menores de 10%) (Cuadro 37).

Para el crecimiento de plantas en macetas o contenedor es indispensable que la distribución de poros sea adecuada, para que el sustrato retenga cantidades convenientes de agua y aire. Sin embargo, no es suficiente que la cantidad total de agua retenida sea necesaria para la planta, ya que puede estar inmovilizada con una fuerza superior a la succión que es capaz de ejercer la planta. La mayoría de los materiales que se utilizan como sustratos tienen poros dentro y entre partículas, lo cual aumenta el espacio vacío (Adler, 1992; Burés, 1997). Orozco *et al.* (1995) trabajaron con perlita y encontraron correlación entre el tamaño de partícula y el tamaño de poro, y determinaron que la porosidad interna puede tener un efecto significativo en la retención de agua; no obstante, esta no puede ser cuantificada y diferenciada fácilmente por las relaciones agua-aire (Burés *et al.*, 1993).

Existe una gran cantidad de materiales porosos que pueden emplearse para cubrir las necesidades de cada cultivo; las características de los diferentes materiales varían en intervalos muy amplios, lo cual con lleva a definir que no puede haber un sustrato “ideal”, para todos los cultivos, debido a que no todas las especies ornamentales tienen los mismos requerimientos; por ejemplo, las plantas epífitas, orquideáceas y bromeliáceas, se desarrollan en mayores tensiones, mientras que las geofitas, *Ficus*, *Philodendron* y otras plantas en menores tensiones.

De Boodt y De Waele (1968) definieron un sustrato ideal. Sin embargo, en la actualidad este concepto es obsoleto, ya que algunos autores no coinciden con esta definición (Raviv *et al.* 1986; Abad, 1995; Abad y Noguera, 1998).

Cuadro 37. Porosidad y retención de agua en diferentes mezclas de sustratos.

Tratamientos	Porosidad y retención de agua (%volumen)					
	EPT ²	CA	AFD	AR	ADD	MS
M1T1 ³	77.94 defg ¹	42.90 abc	14.94 e	3.40 abc	16.70 cde	22.05 bcde
M1T2	76.94 efg	48.88 a	15.11 e	1.44 c	11.49 fgh	23.06 bcd
MIT3	82.20 abcde	49.13 a	22.64 de	2.43 bc	7.99 hij	17.80 defgh
M2T4	74.57 fgh	15.44 ij	50.57 a	3.24 abc	5.32 j	25.43 abc
M2T5	73.83 gh	32.98 def	28.98 bcd	3.62 abc	8.24 hij	26.17 ab
M2T6	77.35 efg	33.19 def	35.77 b	2.89 abc	5.49 j	22.64 bcd
M3T7	84.43 abcd	30.45 f	30.60 bcd	4.78 abc	18.59 bcd	15.57 efgh
M3T8	88.67 a	32.29 ef	30.27 bcd	8.21 abc	17.89 bcd	11.33 h
M3T9	87.55 ab	39.45 cd	31.60 bcd	5.71 abc	10.78 ghi	12.44 gh
M4T10	68.71 h	15.53 ij	34.59 b	8.27 abc	10.32 ghij	31.29 a
M4T11	79.66 cdefg	28.98 fg	29.02 bcd	2.41 bc	19.25 bc	20.33 bcdef
M4T12	81.11 bcdef	37.48 cde	31.24 bcd	3.42 abc	8.97 hij	18.88 cdefg
M5T13	75.27 efgh	12.56 j	49.68 a	5.84 abc	7.18 hij	24.72 abcd
M5T14	79.59 cdefg	40.99 c	28.67 bcd	3.64 abc	6.28 ij	20.41 bcdef
M5T15	77.58 defg	32.95 ef	24.41 cde	8.33 abc	11.88 efgh	22.42 bcde
M6T16	86.11 abc	47.76 ab	22.84 cde	1.42 c	14.08 defg	13.89 fgh
M6T17	88.00 ab	23.21 gh	32.40 bc	9.90 a	22.48 ab	11.99 gh
M6T18	88.50 a	42.34 bc	26.32 bcd	3.35 abc	16.48 cdef	11.50 h
M7T19	87.52 ab	22.36 h	29.79 bcd	9.00 ab	26.37 a	12.47 gh
M8T20	68.58 h	19.16 hi	29.19 bcd	8.83 ab	11.40 gh	31.42 a

¹Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes dentro de cada columna (Tukey, $p < 0.05$).

²EPT = Espacio poroso total, CA = Capacidad de aireación, AFD = Agua fácilmente disponible, AR = Agua de reserva, ADD = Agua difícilmente disponible y MS = Material sólido.

³M = Mezcla, T = Tratamiento.

c. Curva de liberación de agua

La disponibilidad de agua de un sustrato y su relación con las plantas queda perfectamente explicada con la curva de desorción o liberación de agua (De Bood *et al.*, 1974; Handreck y Black, 1991).

Los resultados de la curva de liberación de agua para las diferentes mezclas se muestran en la Figura 55, donde se puede observar, que el tamaño de partícula y los materiales que integran una mezcla influyen en la liberación de agua (De Bood *et al.*, 1974). Los sustratos deben presentar una elevada porosidad y capacidad de retención de la misma, asociados con un drenaje rápido y buena aireación que le permitan cumplir

correctamente las funciones de regulación en el suministro de agua y aire (Milks *et al.*, 1989).

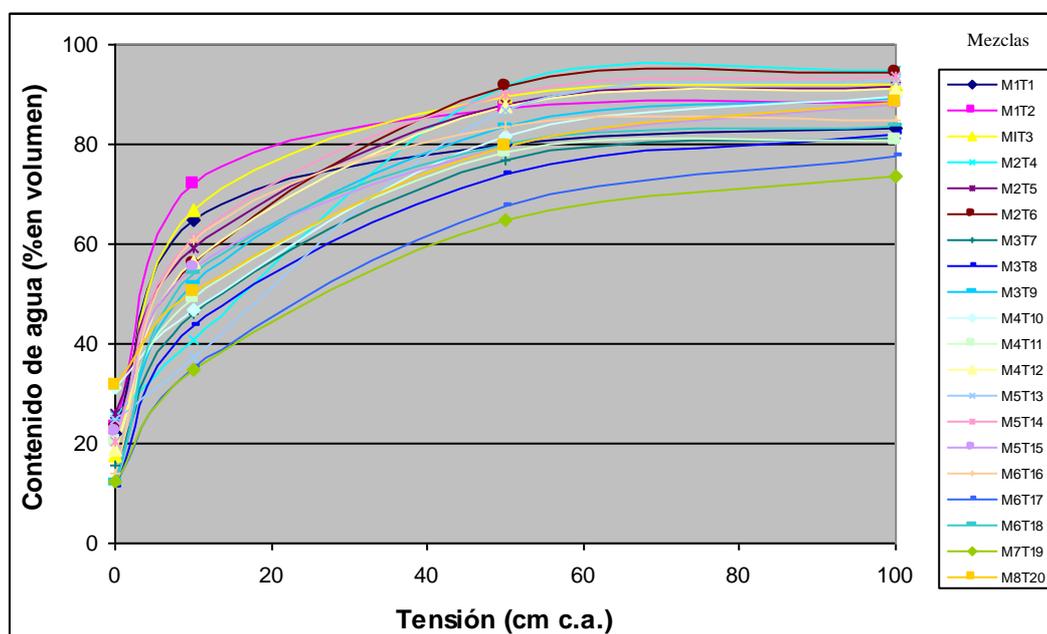


Figura 55. Curva de liberación de agua en diferentes mezclas de sustratos.

5.10 Producción de *Lisianthus (Eustoma grandiflorum)* en las diferentes mezclas de sustrato

La agricultura se está beneficiando con la evolución de la tecnología, poniendo a disposición de los productores variedades competitivas y productivas, junto con los cambios tecnológicos se observa como se está sustituyendo de manera cada vez más importante, el cultivo tradicional en suelo por el cultivo hidropónico (sustratos) (Abad y Noguera, 1997). Este fenómeno es más visible en los sectores intensivos de la agricultura, como la producción hortícola y ornamental.

El desarrollo de sustratos en la horticultura tiene su origen en el cultivo de plantas en contenedor (Burés, 1997), y la demanda en el sector productivo ha obligado a desarrollar materiales adecuados que puedan ser utilizados satisfactoriamente. En plantas cultivadas en macetas o contenedores, el volumen de sustrato es limitado, por lo que éstas absorberán oxígeno, agua y nutrimentos en grandes cantidades. Esto se debe a que se produce una mayor absorción de agua y transpiración por parte de la planta, debido a que el tiempo de apertura de los estomas es superior (Abad, 1993), obligando a regar

frecuentemente, para que en todo momento exista agua fácilmente disponible en el sistema radical, pudiendo ocasionar problemas de aireación.

Los resultados de las variables determinadas en el cultivo de *Lisianthus* se muestran en el Cuadro 38. La mayor altura se presentó en los tratamientos M1T1 al M3T9 (plantas mayores de 15 cm), los cuales también correspondieron al mayor número de botones florales (mayor de 14 botones) (Figura 56). El mayor número de flores abiertas correspondió a los tratamientos M2T5 y M2T6 (Figura57); mientras que el diámetro de la flor osciló entre 4.7 y 5.9 cm en la mayoría de los tratamientos, a excepción del M6T18 con 2 cm y los tratamientos que no presentaron flores abiertas (M6T16, M7T19 y M8T20). Finalmente, la mayor duración de la flor se presentó en el tratamiento M2T6 (22 días) (Figura57a-d), mientras que en los tratamientos restantes con flores abiertas, tuvieron un promedio de duración entre 11 y 19 días, a excepción de los tratamientos que no presentaron flores abiertas.



Figura 56. Altura de plantas de *Lisianthus* en diferentes mezclas de sustratos.

Los intervalos para un mejor desarrollo del cultivo de *Lisianthus* correspondieron a mezclas con valores de: 77.94 a 87.55% de EPT, 15.44 a 49.13 de CA, entre 14.94 a 31.60% de AFD y de 1.44 a 8.21 de AR; la buena aireación y disponibilidad de agua es una característica importante en el crecimiento de las plantas en maceta (Beardsell *et al.*, 1979).

Cuadro 38. Variables de crecimiento en plantas y flores de *Lisianthus* en diferentes mezclas de sustratos.

Tratamientos	Altura final (cm)	Número de botones	Número de flores abiertas	Diámetro de la flor (cm)	Duración de la flor (días)
M1T1 ²	16.8 ab ¹	18.3 ba	4.7 bc	5.7 a	19.3 ab
M1T2	15.3 abcd	15.3 abcd	4.0 bcd	5.2 a	18.3 ab
MIT3	16.2 abc	15.0 abcd	4.3 bcd	5.5 a	11.0 b
M2T4	15.9 abc	20.0 ba	2.3 bcdef	4.8 ba	0.0 c
M2T5	15.2 abcd	14.3 bcde	5.0 ab	5.4 a	16.7 ab
M2T6	16.8 ab	23.7 a	8.3 a	5.9 a	22.0 a
M3T7	17.1 a	15.6 abc	1.0 def	4.7 ba	0.0 c
M3T8	16.6 ab	14.3 bcde	4.7 bc	5.7 a	16.7 ab
M3T9	15.0 abcd	14.33 bcde	4.7 bc	5.7 a	14.7 ab
M4T10	11.7 cdef	8.0 cdef	2.3 bcdef	5.1 a	15.0 ab
M4T11	10.1 ef	6.7 def	2.7 bcdef	5.1 a	12.7 ab
M4T12	12.4 bcde	8.3 cdef	3.7 bcde	4.9 ab	13.0 ab
M5T13	9.4 ef	5.7 ef	1.7 bcdef	5.3 a	12.3 b
M5T14	9.6 ef	4.7 f	1.3 cdef	5.6 a	19 ab
M5T15	12.5 bcde	9.0 cdef	1.0 def	5.2 a	0.0 c
M6T16	9.0 ef	2.3 f	0.0 f	0.0 c	0.0 c
M6T17	11.1 def	6.0 ef	2.3 bcdef	5.2 a	12.3 b
M6T18	9.9 ef	4.0 f	0.3 ef	2.0 bc	0.0 c
M7T19	7.6 f	2.3 f	0.0 f	0.0 c	0.0 c
M8T20	13.4 abcde	8.3 cdef	0.3 ef	0.0 c	0.0 c

¹Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes dentro de cada columna (Tukey, $p < 0.05$).

²M = Mezcla y T= Tratamiento.



Figura 57. Botones florales, número y diámetro de flores en el cultivo de *Lisianthus*.

Los mejores resultados para todas las variables de respuesta, se mostraron en tratamientos con mezclas de fibra de coco combinada con cualquier tipo de material inorgánico (tezontle, piedra pómez y perlita) y un tamaño de partícula homogéneo (3.36 o 1 mm) (Figura 58a-c); en comparación con las mezclas de peat moss y los testigos (Figura 58b-c).

La fibra de coco tiene un efecto estimulante sobre el crecimiento del *Lisianthus*, una elevada porosidad total, retiene cantidades aceptables de agua fácilmente disponible y es fácil de manejar, sus residuos participan en procesos de humificación y enriquecimiento de la materia orgánica del suelo. Algunas desventajas son la falta de homogeneidad de las distintas partidas, procedencias y modalidad de presentación, alta salinidad de algunos lotes y la garantía del suministro.



Figura 58. Crecimiento de *Lisianthus* en diferentes mezclas de sustratos: a) mezclas con fibra de coco, b) mezclas con peat moss y c) comparación entre mezclas de fibra de coco y peat moss.

Prasad (1997) reportó que el polvo de coco en varios ensayos realizados presentó propiedades físicas, químicas y biológicas adecuadas para ser usado como sustrato. Awang y Razi (1997), señalaron que su uso aún cuando sea el único material en el que crecen las plantas, no ocasiona ningún problema de anclaje en cultivos ornamentales anuales a pesar de tener baja densidad aparente; indican además que si se mezcla con arena (1:1 v/v) este valor se incrementa, además de mejorar la humectabilidad en más de 33% y se obtiene una porosidad de aire de hasta 35%, manteniendo un nivel satisfactorio de agua fácilmente disponible. Por otra parte, comparándolo con el peat moss, se encontró que la capacidad amortiguadora de agua en el polvo de coco, estuvo por debajo de lo considerado como adecuado, lo cual indica un incremento en la transpiración de las plantas por lo que éstas tenderán a marchitarse más rápidamente si el régimen de riego no es ajustado. Maerow (1994) evaluó el crecimiento de dos plantas ornamentales subtropicales comparando el

polvo de coco y la turba, y señaló que el polvo de coco parece ser un sustituto aceptable para usarse como sustrato.

Actualmente, la fibra de coco comienza a introducirse lentamente como sustrato en sistemas de cultivo sin suelo. Se recomienda que previo al empleo del sustrato se deba realizar un análisis del mismo, para proceder al posible ajuste de la solución nutritiva ó al lavado del sustrato en caso de exceso de sales, se pueden utilizar contenedores de 16 a 24 L de capacidad, en los que se introducirá y disgregará ésta.

a. Peso de materia fresca y seca en plantas de Lisianthus

Los resultados del primer muestreo a la mitad del experimento (7 semanas) para ver el efecto de las mezclas en altura y pesos de materia seca y fresca, tanto en raíces como en la parte aérea, se muestran en el Cuadro 39.

Se observa que en cuanto a la altura, los tratamientos presentaron un crecimiento similar; mientras que para las variables de peso de materia fresca y seca, tanto la parte aérea como radical, no presentaron una tendencia definida. Sin embargo, se observó que los tratamientos con tamaños de partícula homogéneos presentaron un mayor desarrollo radical en comparación a los tratamientos a granel (Figura 59).



Figura 59. Desarrollo radical en diferentes tamaños de partícula del sustrato: a) desarrollo radical en M1T1 (fibra de coco + tezontle a granel) y b) M1T3 (fibra de coco + tezontle con tamaño de partícula de 1 mm).

Cuadro 39. Altura y peso de materia fresca y seca en raíces y parte aérea de plantas de *Lisianthus* en diferentes mezclas de sustratos a las 7 semanas.

Tratamientos	Altura (cm)	PMFR ²	PMFA	PMSR	PMSA
		(g)			
M1T1 ¹	6	0.5	1.7	0.0449	0.1947
M1T2	6	0.7	2.4	0.1475	0.3139
MIT3	6.5	1.7	3.8	0.1658	0.4358
M2T4	6	0.7	2.1	0.0881	0.2962
M2T5	6	1	2.3	0.1094	0.2833
M2T6	6.5	0.8	3.9	0.0776	0.3701
M3T7	6	0.3	0.8	0.0406	0.1715
M3T8	6	0.6	2.2	0.0527	0.2611
M3T9	6	1.4	2.7	0.1522	0.3144
M4T10	6.5	0.6	1.5	0.064	0.2477
M4T11	6.5	1.2	2.6	0.1337	0.3954
M4T12	6	0.6	3.8	0.0936	0.5191
M5T13	6	0.4	1.1	0.0549	0.1772
M5T14	6	0.9	2.3	0.0982	0.2665
M5T15	6.5	1	3	0.1057	0.3471
M6T16	5.5	0.4	1.3	0.0559	0.1901
M6T17	5.5	0.7	1.7	0.0916	0.2439
M6T18	6	0.9	2	0.0766	0.3089
M7T19	4.5	0.6	2.1	0.0656	0.2721
M8T20	5.5	0.4	2	0.0449	0.2304

¹M = Mezcla, T= Tratamiento.

²PMFR = Peso de materia fresca radical, PMFA = Peso de materia fresca aérea, PMSR = Peso de materia seca radical y PMSA = Peso de materia seca aérea.

Durante el primer muestreo a las siete semanas, se presentó una tendencia más marcada de la influencia del tamaño de partícula; las plantas desarrolladas en tamaños de 1 mm mostraron mejor desarrollo tanto de la parte aérea como la radical (Figura 60). Entre los diferentes materiales empleados, las mezclas con fibra de coco en comparación con el peat moss o turba de *Sphagnum* presentaron predominantemente los valores más altos.

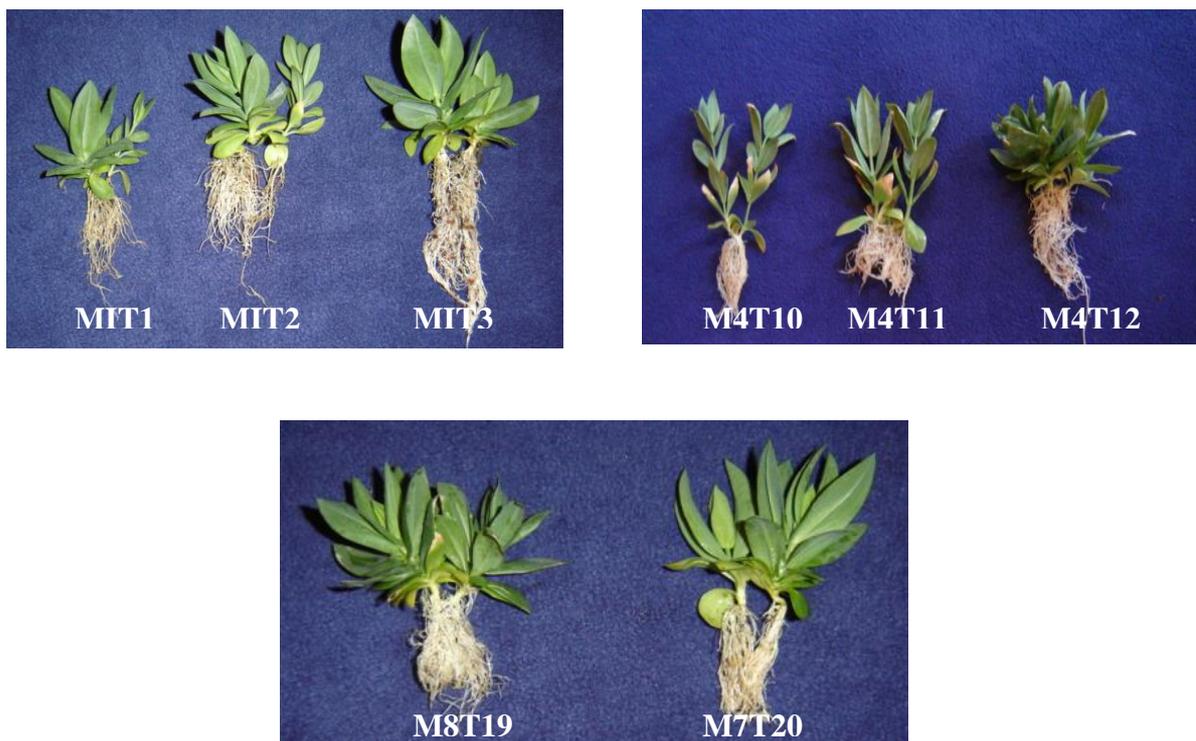


Figura 60. Desarrollo de plantas de *Lisianthus* en diferentes mezclas de sustratos a las siete semanas.

Los resultados del muestreo final (14 semanas) para peso de materia fresca y seca, tanto de la parte radical como de la aérea, se muestran en el Cuadro 40. Los mayores valores correspondieron a las mezclas compuestas de fibra de coco en combinación con materiales inorgánicos (tezontle, piedra pómez y perlita). Las plantas presentaron una uniformidad en peso y un buen desarrollo en la parte radical, mientras que para los tratamientos correspondientes a peat moss se observaron los menores valores (de M4T10 a M6T18) al igual que los testigos (M7T19 y M8T20) (Figura 61).

El manejo del agua de riego está relacionado con las características del espacio poroso y las partículas definen las propiedades físicas, como los poros situados entre ellas y la retención de humedad. Puustjärvi (1982) reportó que el mejor sustrato es el material de textura media a gruesa, con una mejor distribución de tamaño de poros que retienen suficiente AFD y CA adecuada; mientras que los materiales finos (partículas menores que 1 mm), presentaron poros de menor tamaño, retienen grandes cantidades de agua difícilmente disponible, menor capacidad de aireación y suelen compactarse, generando

problemas en el desarrollo radical de las plantas. Estos resultados coinciden con el presente trabajo, ya que las plantas cultivadas en mezclas con peat moss tuvieron esta problemática, mostrando que el buen desarrollo del sistema radical, está directamente asociado con el sustrato.

Cuadro 40. Peso de materia fresca y seca en raíces y parte aérea de plantas de *Lisianthus* en diferentes mezclas de sustratos a las 14 semanas.

Tratamientos	PMFR ³	PMFA	PMSR	PMSA
	(g)			
M1T1 ²	5.33 ab ¹	32.85 ab	0.6207 abc	4.391ab
M1T2	3.08 bcde	22.95 abcde	0.6185 abc	3.078 abcde
MIT3	3.83 abcde	26.61 abc	0.7702 abc	3.510 abcd
M2T4	3.08 bcde	27.28 abc	0.5791 abc	3.592 abcd
M2T5	3.55 abcde	19.62 bcdef	0.5593 abc	2.674 bcdef
M2T6	4.52 abcd	33.39 ab	0.6867 abc	4.580 a
M3T7	6.68 a	35.57 a	0.9494 a	4.183 abc
M3T8	4.83 abc	26.39 abc	0.8086 ab	3.593 abcd
M3T9	5.81 ab	24.97 abcd	0.7956 ab	3.946 abc
M4T10	1.00 e	12.38 cdef	0.2176 bc	1.987defg
M4T11	1.09 e	9.57 ef	0.2078 bc	1.483 efg
M4T12	1.49 de	14.65 cdef	0.3734 abc	2.521 cdef
M5T13	0.77 e	8.60 ef	0.1573 bc	1.424 efg
M5T14	0.87 e	5.67 f	0.1539 bc	0.888 fg
M5T15	1.93 cde	15.80 cdef	0.3474 abc	2.568 cdef
M6T16	0.63 e	5.42 f	0.1040 c	0.719 g
M6T17	1.66 cde	11.05 def	0.3251 abc	1.638 efg
M6T18	1.15 e	8.44 ef	0.2113 bc	1.254 fg
M7T19	1.46 de	6.92 f	0.2536 bc	1.090 fg
M8T20	3.01 bcde	19.94 bcdef	0.5246 abc	2.658 bcdef

¹Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes dentro de cada columna (Tukey, $p < 0.05$).

²M = Mezcla, T= Tratamiento.

³PMFR = Peso de materia fresca radical, PMFA = Peso de materia fresca aérea, PMSR = Peso de materia seca radical y PMSA = Peso de materia seca aérea.

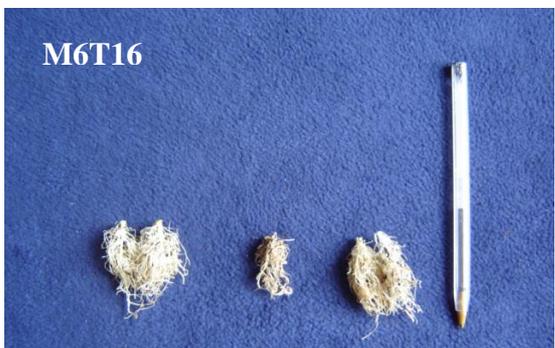


Figura 61. Distribución radical y aérea en plantas de *Lisianthus* en diferentes mezclas de sustratos.

Es importante señalar, que la mezcla de dos o más componentes, por lo general produce interacciones, y que las propiedades físicas de la mezcla final no son la media óptima de las propiedades de los materiales que la integran, por lo tanto no son propiedades aditivas, por lo que, es necesario determinar en cada caso las propiedades físicas y micromorfológicas de las mezclas resultantes.

La elección de una determinada mezcla de sustrato va a depender por orden de prioridad: de la disponibilidad de los materiales, la finalidad de la producción y especie cultivada, propiedades (físicas, químicas, biológicas y micromorfológicas), costo, la experiencia de manejo, homogeneidad y la dedicación al sistema. Los resultados permitirán ser un punto de partida, para la obtención de modelos que se apliquen favorablemente en la obtención de mezclas, para cualquier sistema de producción, que definirán una serie de factores de calidad, mediante la descripción de las características físicas e hidrológicas. Generalmente, se recomienda utilizar por lo menos 40% de componente orgánico y entre 20 y 30% de inorgánico para obtener beneficios adecuados (Cabrera, 1999).

5.11 Uso eficiente del agua en diferentes mezclas de sustratos para el cultivo de *Lisianthus*

La producción rentable de cultivos hortícolas en maceta o contenedor exige un control preciso del agua y la fertilización, por lo que es necesario desarrollar sustratos que proporcionen el suministro adecuado a la planta (Nogera *et al.*, 2003; Prasad y Ni Chualáin, 2004; Raviv *et al.*, 2004), pero que drenen lo suficientemente para tener una buena aireación del sistema radical. Sin embargo, esto originó la utilización de grandes cantidades de agua y nutrientes, con un porcentaje importante de pérdidas por drenaje, lo cual ha provocado un incremento de la contaminación causada por pesticidas y fertilizantes (Fonteno, 1993). Ante ésta problemática, no sólo es necesario originar mezclas de sustratos, sino también hacer mezclas más eficientes, para proporcionar disponibilidad de agua y fertilizantes a la planta (Fonteno, 1993). La mejora de ésta eficiencia, exige un mejor entendimiento de las propiedades físicas, micromorfológicas e hidráulicas de los sustratos, y tener diagnósticos más acertados en la evaluación de los mismos a partir de sus propiedades.

Los resultados de la frecuencia de riego se muestran en el Cuadro 41. Cabe señalar, que las mediciones de riego se iniciaron a partir de la cuarta semana después del trasplante. Se observó que los tratamientos con mayor frecuencia de riego son los de tamaños de partícula de 3.36 mm, correspondientes a fibra de coco en combinación con tezontle, piedra pómez y perlita en los tratamientos M1T2, M2T5 y M3T8, respectivamente. Por lo que la frecuencia de riego se debe definir de acuerdo a la mezcla de sustrato y al cultivo. Futura *et al.* (1976); Burger *et al.* (1987) y Regan (1991) mencionaron, que la frecuencia de riego es importante tanto en el manejo de viveros como de invernaderos, por lo tanto, definir el tiempo que transcurre entre las aplicaciones de agua depende de varios factores, que pueden estar afectado tanto al sustrato (capacidad de almacenamiento y la capacidad de transporte de agua) como a las plantas (diferencias entre los cultivares de una especie, estado fonológico y sanitario de la planta, estado nutricional, sombra, etc.)

Las tasas de riego aplicadas con mayor frecuencia, pueden aumentar la eficiencia de aplicación en un riego. Toledo (1996), señaló que para disminuir las pérdidas excesivas por percolación se pueden aplicar láminas de agua en forma parcializada pero con riegos más frecuentes, generando un mayor aprovechamiento por parte de las plantas, ya que riegos demasiado frecuentes, pueden causar encharcamiento o saturación del sustrato, provocando hipoxia y enfermedades fungosas a las plantas que se cultivan en maceta o contenedor, sobre todo con sustratos de alta porosidad como el peat moss. Sin embargo, el exceso de agua en un cultivo puede ser rápidamente transpirado por la planta, bajo condiciones de invernadero (Heiskanen, 1995).

Uno de los factores importantes de la frecuencia de riego es la aireación del sustrato, además del tamaño y distribución de los poros e intensidad de la transpiración; mientras mayor sea la cantidad de macroporos mejor será la aireación, ya que las raíces de las plantas obtienen el oxígeno una vez éstos han drenado después del riego. Es conocido, que el agua se almacena en los poros del sustrato, por lo que las raíces absorben el agua de los poros más próximos; esto desequilibra el sistema, que tiende a reponer el agua, transportándola de los poros más alejados (Martínez *et al.*, 2006). La capacidad para transportar el agua, y en consecuencia para reponer el equilibrio, es una particularidad del sustrato que depende de las características del espacio poroso. Por otra parte, el aporte que

realiza la evapotranspiración, desechando el agua que permanece en los poros que no se han drenado, favorece la aireación del medio radical (Paul y Lee, 1976).

Las frecuencias de riego se deben establecer de acuerdo a las mezclas de sustratos. Cosió (1997) y Fernández (1997), controlaron la frecuencia de riego mediante tensiómetros; los resultados sugirieron que la utilización de este instrumento en contenedores presenta algunas restricciones, debido principalmente a la distribución heterogénea del agua en el sustrato cuando se aplican pequeñas cantidades, lo cual, significa que no sería confiable establecer un punto crítico de riego con base a este instrumento.

Cuadro 41. Frecuencia de riegos en diferentes mezclas de sustratos.

Tratamientos	Numero total de riegos	Frecuencia (No. de días entre cada riego)
M1T1 ¹	14	3-4-6-5-5-5-3-4-7-6-5-3-3-6
M1T2	20	0-3-4-3-3-3-2-3-2-5-3-4-4-3-4-2-5-3-3-6
MIT3	15	3-4-6-3-2-5-5-3-4-7-6-5-3-3-6
M2T4	14	3-4-6-5-5-5-3-4-7-6-5-3-3-6
M2T5	20	0-3-4-3-3-3-2-3-2-5-3-4-4-3-4-2-5-3-3-6
M2T6	15	3-4-6-3-2-5-5-3-4-7-6-5-3-3-6
M3T7	14	3-4-6-5-5-5-3-4-7-6-5-3-3-6
M3T8	20	0-3-4-3-3-3-2-3-2-5-3-4-4-3-4-2-5-3-3-6
M3T9	15	3-4-6-3-2-5-5-3-4-7-6-5-3-3-6
M4T10	13	3-4-6-5-5-5-3-4-7-6-5-6-6
M4T11	13	3-4-6-5-5-5-3-4-7-6-5-3-9
M4T12	12	3-4-6-5-5-5-3-4-7-6-5-12
M5T13	13	3-4-6-5-5-5-3-4-7-6-5-6-6
M5T14	13	3-4-6-5-5-5-3-4-7-6-5-3-9
M5T15	13	3-4-6-5-5-5-3-4-7-6-5-6-6
M6T16	12	3-4-6-5-5-5-3-4-7-6-5-12
M6T17	14	3-4-6-5-5-5-3-4-7-6-5-3-3-6
M6T18	13	3-4-6-5-5-5-3-4-7-6-5-6-6
M7T19	12	3-4-6-5-5-5-3-4-7-6-5-12
M8T20	13	3-4-6-5-5-5-3-4-7-6-5-3-9

¹M = Mezcla y T = Tratamiento.

El registro de las láminas de riego para los diferentes tratamientos se muestra en el Cuadro 42. Se observó que las mayores cantidades de agua se aplicaron en todos los tratamientos correspondientes a fibra de coco (de M1T1 a M3T9), así como también las cantidades drenadas (entre 646 a 1555 mm). Mientras que para la eficiencia de riego los valores más altos se presentaron en los tratamientos con tamaños de partícula de 1 mm, con valores arriba de 80%, seguidos de los tratamientos a granel (de 79 a 86.6%) y finalmente los de tamaños de 3.36 mm (de 60 a 79%). Carmona *et al.* (2003) indicaron que el tamaño de partícula afecta el tamaño y distribución de los poros, así como la relación agua-aire y por consiguiente el régimen de irrigación y el crecimiento de la planta.

Prasad y Ni Chualáin, (2004) generaron sustratos con diferentes proporciones desde 0 hasta 100% de partículas menores de 1 mm y evaluaron la CA en sustratos de turba y mezclas de turba, polvo de coco, corteza de pino, desechos de plantas composteados y piedra pómez, y concluyeron que el porcentaje de partículas menores de 1 mm están estrechamente relacionadas con la CA. Debido al grosor de los materiales la penetración del agua podría ser muy poca, ya que la proporción de la porosidad del espacio interno sería grande y entre menor sea el tamaño de partícula, la proporción de poros internos podría decrecer e incrementarse la penetración de agua; no se debe olvidar que muchas partículas finas contienen poros internos en los cuales el agua de riego no puede penetrar; por lo tanto, la porosidad interna no siempre se encuentra interconectada, a excepción de la piedra pómez, donde si lo esta.

Cuadro 42. Láminas de riego promedio aplicadas para mezclas de sustrato con su respectivo drenaje y eficiencia de aplicación.

Tratamientos	Lámina aplicada (mm)	Lámina drenada (mm)	Lámina retenida (mm)	Eficiencia de aplicación (%)
M1T1 ¹	3600	736.00	2864.00	79.56
M1T2	4000	1392.33	2607.67	65.19
MIT3	4000	945.00	3055.00	76.38
M2T4	3750	732.67	3017.33	80.46
M2T5	3800	1504.67	2295.33	60.40
M2T6	3800	687.67	3112.33	81.90
M3T7	3650	646.33	3003.67	82.29
M3T8	4050	1555.00	2495.00	61.60
M3T9	3950	978.67	2971.33	75.22
M4T10	3000	536.33	2463.67	82.12
M4T11	3000	681.00	2319.00	77.30
M4T12	2850	404.67	2445.33	85.80
M5T13	3000	637.67	2362.33	78.74
M5T14	2650	621.67	2028.33	76.54
M5T15	3150	568.00	2582.00	81.97
M6T16	2900	646.33	2253.67	77.71
M6T17	3100	647.67	2452.33	79.11
M6T18	3250	612.67	2637.33	81.15
M7T19	2900	517.33	2382.67	82.16
M8T20	3550	475.67	3074.33	86.60

¹ M = Mezcla y T = Tratamiento

a. Relaciones hídricas sustrato-planta

Se puede apreciar que el grupo de plantas en sustrato con fibra de coco tienen una altura mayor, así como el número de botones florales de los tratamientos M1T1 a M3T9 (Figura 62), mismos que durante el desarrollo del experimento, presentaron mayores requerimientos hídricos debido a un incremento de la superficie evapotranspirativa.

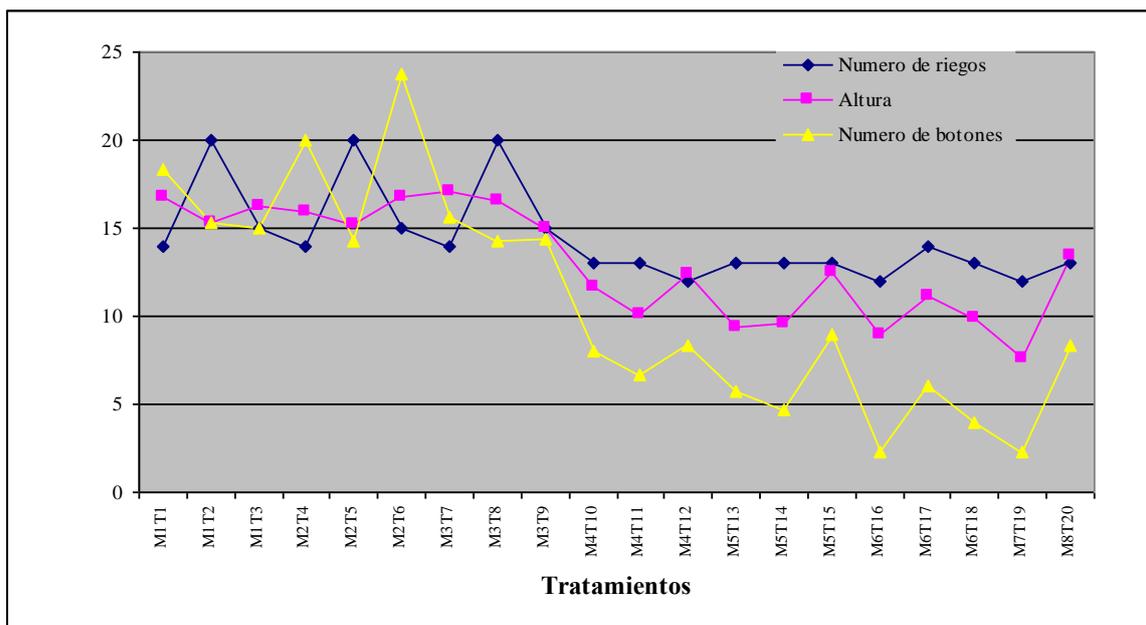


Figura 62. Efecto de las mezclas de sustrato sobre el número de riegos, altura de la planta y botones florales en *Lisianthus*.

Ventura (2001) comparó el polvo de coco con el sustrato derivado de la cáscara de almendra para la producción de tomate, y reportó que el primero presentó mayor precocidad y capacidad de enraizamiento, menos problemas fitoanitarios, además de mejor calidad y 21% más de producción en Judía (*Phaseolus vulgaris* cv Mantra), destacando que demanda un mayor consumo de agua que otros materiales. García *et al.* (2001) compararon mezclas de sustratos (cascarilla de arroz, corteza de pino, composta, piedra pómez, tezontle y polvo de coco) para la producción de especies ornamentales y concluyeron que la mejor calidad y productividad se presentó en los tratamientos que contenían polvo de coco.

La toma de dediciones, como el tipo de sustrato a utilizar, el tamaño de partícula, el programa de riego y fertilización es fundamental, por lo que el análisis granulométrico debe considerarse como una práctica de rutina para la caracterización de los materiales.

b. Conductividad eléctrica (CE) y pH

Las sales provienen de los fertilizantes, de impurezas en el agua de riego y de la materia orgánica. Todos los nutrientes disponibles para absorción reciben el nombre de sales solubles. Su contenido inicial debe ser bajo, para evitar daños en las plantas jóvenes que son sensibles a ellas.

Durante el proceso productivo se midió la conductividad eléctrica (CE) y el pH. El agua ocupada para los riegos tuvo una CE de 0.6 mS y un pH de 7. La solución Steiner se ajustó a una CE de 2.10 mS/cm y un pH de 5.5 en cada riego. Al término del ensayo se midió la conductividad eléctrica (CE) y el pH de los lixiviados del sustrato, para determinar y evaluar el efecto de cada tratamiento, sobre estas variables y sus posibles consecuencias en el crecimiento de las plantas. La Figura 63 muestra la CE en los lixiviados de las mezclas de sustratos, los mayores cambios se observaron en mezclas que contenían fibra de coco con piedra pómez (M2T6) y perlita (M3T9), así como peat moss con los mismos materiales inorgánicos (M5T13 y M6T17). La mayor acumulación de sales se observó en el testigo (M8T20), lo cual se debe a la naturaleza de los materiales orgánicos utilizados como la vermicoposta y el peat moss.

Se observó que los tratamientos con baja percolación (tratamientos con peat moss), debido a la redondez de las partículas, mostraron los bordes de las hojas de las plantas ligeramente necrosadas, debido posiblemente a las sales que se encontraban en el sustrato, no así los tratamientos que presentaron una fracción de lixiviado mayor, ya que se producían un lavado de sales. Ballester-Olmos *et al.* (1989) mencionaron que es preferible que los cultivos en maceta presenten dosis de riego que provoquen un lavado de sales en la parte superior (aportados por aguas salinas y/o soluciones nutritivas), y obligarlas a bajar hasta la parte inferior de la maceta, en cuya zona está comprobado que no causan daño. Al respecto, Ku y Hershey (1991) señalaron que al aplicar una solución al sustrato se puede encontrar que en la parte superior de la maceta, el contenido de sales puede ser bajo con respecto a la parte inferior, cuando no ocurre lixiviación o ésta es reducida. Esta situación puede proveer una estrategia para que las plantas crezcan con una mínima lixiviación, desarrollando las raíces en la parte superior, en donde la concentración salina es menor.

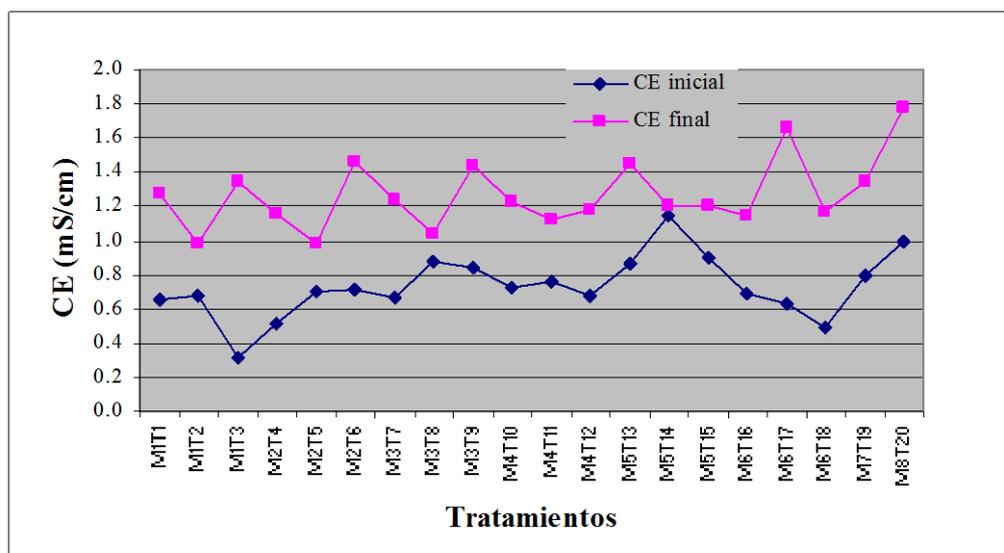


Figura 63. Conductividad eléctrica inicial y final en diferentes mezclas de sustrato para el cultivo de *Lisianthus*.

La CE adecuada para la mayoría de las plantas está entre 0.75 y 2 mS/cm y se consideran valores elevados arriba de 3.5 mS/cm, por lo que las CE se encuentran en intervalos aceptables. Por lo tanto, las sales en el rango observado pueden no afectar el crecimiento de las plantas, por ende su menor crecimiento, probablemente se deba a problemas hídricos. Los tratamientos que lograron alturas mayores, se encontraban en una situación intermedia con respecto a las sales. Se puede decir, que las sales no afectaron de manera considerable su crecimiento; aunque la retención de agua de un sustrato sea elevada, puede ocurrir que se encuentre absorbida en los microporos de menor tamaño, con la fuerza superior a la succión que la planta es capaz de ejercer, por lo que no se encontrará disponible. Por lo tanto, la cantidad de agua disponible, dependerá del tamaño de los poros más pequeños y de la concentración de sales en la solución acuosa. Cuando mayor sea esta última, mayor será la succión que tendrá que aplicar la planta, pudiendo llegarse en condiciones extremas (salinidad) a la deshidratación de la planta.

En cuanto al pH, los mayores valores se encontraron en sustratos de fibra de coco, independientemente del material inorgánico con el que combine. Se observó un incremento marcado de pH al final del experimento (Figura 64). Sin embargo, el pH se mantuvo durante el desarrollo de *Lisianthus* entre 5 y 7 en las mezclas MIT1 al M3T9;

mientras que en los tratamientos con peat moss el pH fue más ácido, y en éstas condiciones el desarrollo de las plantas fue menor.

El pH influye en la disponibilidad de los nutrientes por la planta; con un pH inferior que 5 pueden presentarse deficiencias de nitrógeno (N), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y con valores superiores a 6.5 se disminuye la disponibilidad de hierro (Fe), fósforo (P), manganeso (Mn), boro (B), zinc (Zn), y cobre (Cu). El nivel óptimo aconsejado para el manejo de cultivo sin suelo de hortalizas en la disolución del sustrato se sitúa en valores comprendidos entre 5.5 y 6.8, que es el rango en el que se encuentran de forma asimilable la mayor parte de los nutrientes. Los intervalos de pH recomendados para el cultivo de *Lisianthus* es entre 6 y 6.5 (PanAmerican Seed, 2003).

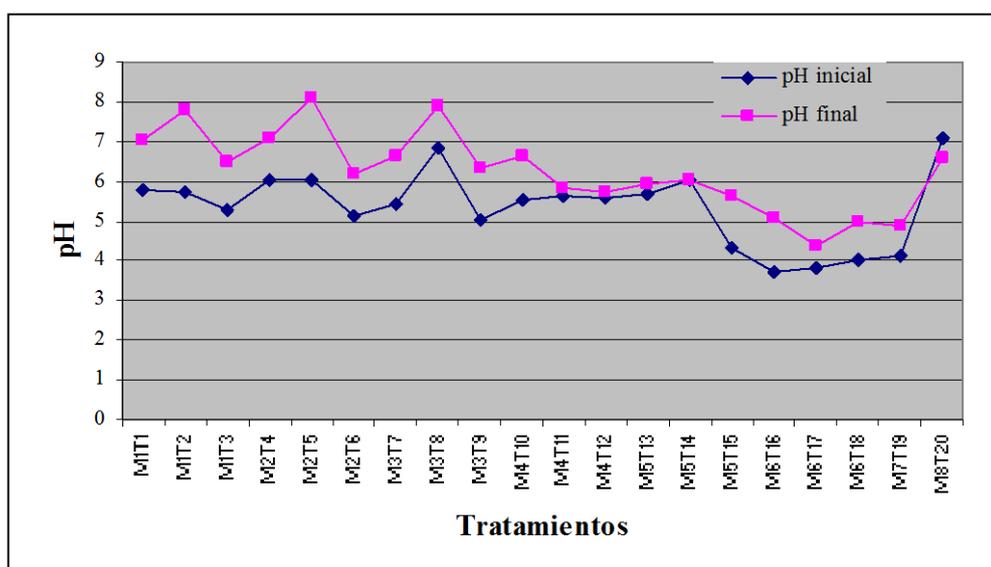


Figura 64. pH inicial y final en diferentes mezclas de sustrato para el cultivo de *Lisianthus*.

Las características de los sustratos son diferentes de acuerdo con la finalidad, por ejemplo, los sustratos destinados a germinación de semillas deben ser de fácil manejo, partículas finas y elevada retención de agua, para mantener una humedad constante, baja salinidad; mientras que en plantas arbustivas o frutales, se requiere de mayores tamaños de partícula, ya que las de menor tamaño podrían provocar problemas en la parte radical. También es recomendable considerar la velocidad de descomposición de los sustratos, que se presenta en materiales generalmente orgánicos, siendo deseable para el manejo de

sistemas de cultivo una baja velocidad de descomposición por degradación biológica (Michiels *et al.*, 1993).

En este caso, el periodo de crecimiento de *Lisianthus* para maceta fue de 14 semanas, periodo que se considera corto en comparación con otros cultivos. En aquellos casos en los que opte por la elección de un sustrato orgánico y se pretenda una larga duración de cultivo, se deberá elegir y tomar las medidas oportunas para evitar una rápida degradación y la compactación, ya que se reduciría el espacio poroso total y la capacidad de aireación a lo largo del cultivo (Ordovás *et al.*, 1997).

5.12 Análisis económico en diferentes mezclas de sustratos para la producción de *Lisianthus*

El productor que elige el uso de un sustrato debe decidir si comprarlo listo para usarse o para mezclarlo; esta decisión debe basarse en los costos de producción. Se tiene que calcular el costo del sustrato que se va a formular, sin olvidar incluir el tiempo de manipuleo y los costos de esterilización o bien compararlo con el precio comercial existente en el mercado.

Los costos de insumos y mano de obra para la producción de *Lisianthus* en maceta se muestran en los Cuadros 43 y 44.

Cuadro 43. Costos de insumos para la producción de *Lisianthus* en maceta.

Concepto	Costo de producción por maceta (\$)
Plántula (2 por maceta)	5.04
Maceta de 1L	0.88
Fertilizantes ¹	0.55
Agroquímicos ²	2.07
Total	8.54

¹Los fertilizantes usados fueron: nitrato de calcio, nitrato de potasio, fosfato monobásico de potasio, sulfato de potasio, sulfato de magnesio, microelementos (sulfato de manganeso, ác. bórico, sulfato de zinc, sulfato de cobre, FeEDTA).

²Los agroquímicos usados en el proceso productivo fueron: previcur, furadan, arrivo 200CE, formol y ridomil.

Cuadro 44. Costos de mano de obra.

Concepto	Costo por maceta¹ (\$)
Esterilización de sustratos	0.6
Preparación de la mezcla, llenado de macetas y trasplante	0.6
Riego y aplicación de agroquímicos	1.2
Total	2.4

¹Costo calculado en función a los jornales.

Los costos de los materiales usados como sustratos se muestran en el Cuadro 45.

Cuadro 45. Costos de materiales usados como sustratos.

Sustrato	Cantidad	Costo (\$)
Peat moss <i>Sphagnum</i>	Bulto de 3.8 pies ³	386.0
Fibra de coco	Bulto de 180 L	180.0
Tezontle	1 m ³	210.0
Piedra pómez	1 m ³	113.0
Perlita	Bulto de 100 L	100.0
Vermicoposta	1 Ton.	2,000.0

En el Cuadro 46 se presentan los costos de producción del cultivo de *Lisianthus* para las diferentes mezclas de sustratos. Los precios de venta se generan a partir de los costos del proceso de producción del cultivo y se establecen de acuerdo a la calidad de la planta como: altura, número de botones florales y follaje libre de enfermedades. En el caso de *Lisianthus* en maceta la calidad se divide en dos: de primera calidad con alturas mayores de 13 cm y más de 10 botones florales, mientras que las de segunda calidad corresponden a alturas menores de 13 cm y menos de 10 botones florales (Viveros Floraplant).

Los resultados mostraron que los tratamientos con fibra de coco en combinación con cualquier material inorgánico (de M1T1 a M3T9), presentaron plantas de primera calidad con alturas mayores de 13 cm y más de 13 botones florales, mientras que las plantas de segunda calidad se observaron en los tratamientos con peat moss (de M4T10 a M6T18) y los testigos (M7T19 y M8T20), ambas calidades estuvieron libres de plagas y enfermedades.

A partir de los análisis de costos en el sistema de producción se encontró que el valor del sustrato constituye una parte reducida, aún cuando la diferencia en precio entre las mezclas pueda ser elevada. Sin embargo, los sustratos son los que determinan la calidad final de las plantas, lo que se refleja en el ingreso neto al final del ciclo de producción, ya que las mejores calidades se obtuvieron en sustratos con fibra de coco y, por consiguiente, alcanzaron un mayor precio de venta (Cuadro 46). Se debe tener especial cuidado, ya que los gastos generados por un mayor tiempo de permanencia en invernadero, se reflejan en los gastos de producción.

Las relaciones ingreso neto/costo total (IN/CT) varían entre 0.56 y 0.73 para las mezclas correspondientes a fibra de coco, mientras que para el peat moss y los testigos fueron de 0.05 a 0.21.

Si se considera una relación de IN/CT mínima obtenida de 0.40 (Castillo *et al.*, 2005), todos los tratamientos con fibra de coco presentaron una relación IN/CT superior a 0.40, mientras que para los sustratos a base de peat moss el valor fue menor; por lo tanto, no son económicamente rentables, lo que ya se había observado a partir de los bajos ingresos netos que proporcionaron.

Cuadro 46. Costos de producción para cada tratamiento de sustratos en el cultivo de *Lisianthus*.

Tratamientos	Costo de mezclas de sustratos ¹	Costo de insumos ²	Costo de mano de obra	Costo total	Precio de venta	Ingreso neto	Relación entre IN/CT
	(\$)						
M1T1	0.67	8.54	2.4	11.61	20	8.39	0.72
M1T2	1.53	8.54	2.4	12.47	20	7.53	0.60
MIT3	1.53	8.54	2.4	12.47	20	7.53	0.60
M2T4	0.64	8.54	2.4	11.58	20	8.42	0.73
M2T5	1.50	8.54	2.4	12.44	20	7.56	0.61
M2T6	1.50	8.54	2.4	12.44	20	7.56	0.61
M3T7	1.00	8.54	2.4	11.94	20	8.06	0.68
M3T8	1.86	8.54	2.4	12.8	20	7.2	0.56
M3T9	1.86	8.54	2.4	12.8	20	7.2	0.56
M4T10	2.23	8.54	2.4	13.17	15	1.83	0.14
M4T11	3.09	8.54	2.4	14.03	15	0.97	0.07
M4T12	3.09	8.54	2.4	14.03	15	0.97	0.07
M5T13	2.20	8.54	2.4	13.14	15	1.86	0.14
M5T14	3.05	8.54	2.4	13.99	15	1.01	0.07
M5T15	3.05	8.54	2.4	13.99	15	1.01	0.07
M6T16	2.55	8.54	2.4	13.49	15	1.51	0.11
M6T17	3.41	8.54	2.4	14.35	15	0.65	0.05
M6T18	3.41	8.54	2.4	14.35	15	0.65	0.05
M7T19	2.73	8.54	2.4	13.67	15	1.33	0.10
M8T20	1.47	8.54	2.4	12.41	15	2.59	0.21

¹El costo ya incluye el tamizado de los materiales.

²El ciclo de producción fue de 14 semanas.

Finalmente, el precio de los sustratos debe ser accesible, ya que se puede incrementar de acuerdo a los centros de extracción natural ubicados a distancias significativas del lugar donde van a ser utilizados. De ahí la importancia de abrir nuevas expectativas a materiales autóctonos que hasta hace poco tiempo no eran considerados y cada vez son más atractivos para poder ser incluidos en el proceso de producción.

VI. CONCLUSIONES

1. A partir de la caracterización de los sustratos se pueden conocer las propiedades de cada uno de los materiales, seleccionando aquel que presente las propiedades adecuadas para el desarrollo de cualquier cultivo.
2. Las propiedades físicas (DA, DR, EPT, CA, AFD, AR y ADD) en sustratos orgánicos (fibra de coco, peat moss, composta y vermicomposta) e inorgánicos (tezontle, piedra pómez, perlita y zeolita) están relacionadas con el tamaño de partícula, las cuales a su vez están determinadas por la forma (variabilidad) y la porosidad (empaquetamiento simple, cavidades, fisuras y vesículas), tamaño, ubicación (macro, meso entre partículas y micro dentro de partículas), número y diámetro; teniendo un comportamiento diferente en la retención y movimiento del agua.
3. El tamaño de partícula en los sustratos tiene una influencia en la distribución de los poros (intra e inter partícula) y la relación agua-aire, afectando principalmente el régimen de riego y, por ende, el crecimiento de las plantas, por lo que se recomienda realizar un análisis granulométrico, como una práctica de rutina en la caracterización de sustratos, ya que las propiedades de los materiales individuales no son aditivas al realizarse las mezclas de sustratos.
4. Los mejores materiales para la elaboración de mezclas de sustratos fueron: fibra de coco, peat moss, tezontle, piedra pómez y perlita en tamaños de partícula de 1mm.
5. La combinación de las mezclas de fibra de coco con cualquier material inorgánico (tezontle, piedra pómez y perlita), presentaron la mejor respuesta en el desarrollo del cultivo de *Lisianthus* en maceta (altura de la planta, número de botones florales, número de flores abiertas y diámetro de la flor, peso de materia fresca y seca de la parte aérea y radical), por lo que la fibra de coco es un material que puede ser un sustituto del peat moss.

6. Es indispensable trabajar con sustratos y desarrollar técnicas culturales que reduzcan el lixiviado de nutrientes e incrementen la eficiencia en el uso del agua, en las diferentes fases del sistema de producción. Por lo tanto la compresión de la relación agua-aire en los sustratos, es de gran utilidad, debido a que permite realizar un programa más eficiente del manejo de riego.
7. Las mezclas con fibra de coco mostraron las mejores características físicas; sin embargo, tuvieron una menor retención, especialmente las partículas de 3.36 mm, teniendo un drenaje más rápido, lo cual se debió al acomodamiento de sus partículas rugosas en comparación con las de peat moss (superficies lisas).
8. Desde el punto de vista económico, el costo de los sustratos no representan un gran ingreso, pero sí determina la calidad de las plantas, reflejándose considerablemente en los ingresos netos, especialmente con los tratamientos (de M1T1 a M3T9) de fibra de coco en combinación con cualquier material inorgánico, presentando una relación ingreso neto/costo total arriba de 0.40 (entre 0.56 y 0.73).

VII. LITERATURA CITADA

- Abad M., P. Martínez F., M. Martínez D. y Martínez J. 1993. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Actas de Horticultura* 11:141-154.
- Abad M. 1993. Sustratos. Característica y propiedades. Pp. 47-62. *In* Cultivos sin suelo. F. Cánovas y J.R. Díaz. (ed.) Instituto de Estudios Almerienses. FIAPA.
- Abad M. 1995. Sustratos para el cultivo sin suelo. *In*: F. Nuez (Coord.). El Cultivo del Tomate. pp. 131-166. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Abad M., y P. Noguera. 1998. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. *In*: Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales. C. Cadahía (coord). Mundi-Prensa. Madrid, España. pp: 287-342.
- Abad M., P. Noguera, R.Puchades, A. Maqueira, and V. Nogera. 2003. Physico-chemical and chemical properties of some coconut coir dusts for use as a peat substitute for containerised ornamental plants. *Bioresour. Technol.* 82:241-245.
- Adler P., M. 1992. Porous media: geometry and transports. Butterworth-Heinemann. Stoneham, M.A. USA.
- Airhart D. L.; N. Natarella J., and A. Pokorny F. 1978. The structure of processed pine bark. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 103(3):404-408.
- Alarcón A.; J. J. Almaraz S.; R. Ferrera C.; C. González Ch.; E. Lara H.; J. Manjares M.; R. Quintero L. R. y S. Santamaría R. 2001. Tecnología de hongos micorrízicos en la producción de especies forestales en vivero. CONAFOR. México D. F. 96 p.
- Allen B. L., and B. F. Hajek. 1989. Mineral occurrence in soil invenmental. *In*: J.B. Dixon and S. B. Weed (ed) Minerals in Soil Environments. 2nd ed. S.S.S.A. Book Serv. No. 12 S.S.S.A., Madison, Wi. pp: 199-278.
- Ansorena M., J. 1994. Sustratos, propiedades y caracterización. Mundi Prensa, Madrid. ISBN 84-7114-481-6.
- Arenas M., S. Vavrina C., A. Cornell J., A. Hanlón E., and J. Hochmuth, G. 2002. Coir as an alternative to peat in media for transplant tomato procuction. *HortScience* 37:309-312.

- Argo W. R., and A. Biernbaum, J. 1996. Component comparisons: coconut coir. *Grower Talks*. February.
- Atiyeh R. M., N. Arancon, A. Edwards C., and D. Metzger, J. 2000a. Influence of earthworm-processed pig manure on the growth and yield of greenhouse tomatoes. *Biores. Technol.* 75:175-180.
- Atiyeh R. M., S. Subler, A. Edwards C. G. Bachman, D. Metzger J., and W. Shuster 2000b. Effects of vermicomposts and composts on plant growth in horticultural container media and soil. *Pedobiologia* 44:579-590.
- Auffret A.; C. Ralet M.; F. Guillon, L. Barry J., and F. Thibault, J. 1994. Effect of grinding and experimental conditions on the measurement of hydration properties of dietary fibers. *Lebensmittel Wissenschaft-und-Technologie* 27:166-172.
- Awang Y., and M. Razi I. 1997. The growth and flowering of some annual ornamentals on coconut dust. *Acta Horticulturae* 450:31-37.
- Bagge O. 1967. Determination of volume weight and other properties of peat. Report from the hydrotechnical laboratory and horticultural department of the Royal Veterinary and Agricultural College of Copenhagen, Horticulture.
- Baixauli S. C y J. M. Aguilar O. 2002. Cultivo sin suelo de hortalizas. Aspectos prácticos y experiencias. Ed. Generalitat Valenciana. Consellería de Agricultura, Pesca y Alimentación. Valencia, España. 110 p.
- Baker K., F. 1957. The U.C. system for producing healthy container-grow plants. University of California. Division of Agricultural Sciences.
- Ballester-Olmos F.; J. Fernandez, y M. Molins. 1989. Nota sobre influencia del riego localizado en el crecimiento de plantones de cítricos en invernadero. *Invest. Agr. Prod. Veg.* 4(1):119-124.
- Barker G., and M. Gormson. 1990. The physics of muesli. *New Scientist* 126(1718):37-40.
- Baver L. D., y W. H. Gardner. 1973. Física de suelos. Traducción de *Soil Physics*, John Wiley & Sons. New Cork, Estados Unidos de America, 4a. edición. Unión Tipográfica, Ed. Hispanoamericana, México.
- Beardsell D. V.; G. Nichols, D., and L. Jones D. 1979. Physical properties of nursery potting-mixtures. *Scientia Horticulturae* 11:1-8.
- Bertoldi M., G. Vallini, A. Pera, and F. Zucconi. 1985. Technological aspects of composting including modelling and microbiology. *In: Composting of agricultural and other wastes*. Gasser J. K. R. (Ed.) Elsevier Applied Science Publisher. New York. NY. USA.

- Beneke R. R., and R. Winterboer. 1973. Linear programming applications to agriculture. The Iowa State University Press. Ames, Iowa 50010. U.S.
- Binder K. 1986. Introduction: Theory and “technical” aspects of Monte Carlo simulations. pp: 1-45, *In*: K. Binder (ed.). Monte Carlo methods in statistical physics. Second edition Springer-Verlag, Berlin.
- Blake G. R., and H. Hartge, K. 1986. Particle density. *In*: Methods of soil analysis. Part I. Physical and mineralogical methods. A. Klute (ed). Second edition. Agronomy Monography No. 9. A.S.A., S.S.S.A. Madison USA. pp: 337-382.
- Bodman G. B., and F. Constantin, G. 1965. Influence of particle size distribution in soil compaction. *Hilgardia* 36 (15):567-591.
- Bohne, H., and Gunther, Ch. 1997. Physical properties of peat determined with different methods. *Acta Hort.* 450:271-276.
- Bouabid R.; A. Nater E., and P. Barak. 1992. Measurement of pore size distribution in a lamellar Bt. horizon using epifluorescence microscopy and image analysis. *Geoderma* 53:309-328.
- Boul S. W., F. Hole D., and R. Mc Craken J. 1989. Soil genesis and classification. Third. Edition. Iowa State University. USA.
- Boettinger J. L., and W. Ming, D. 2002. Zeolites. Soil Science Society of America, 677. South Segoe Road, Madison, WI 53711. USA. Soil, Mineralogy with Environmental Applications. SSSA. Book Series No. 7.
- Brady N. C., and R. Weil R. 1999. The nature and properties of soil. Ed. Prentice Hall. New Jersey. United States of America. 881p
- Brewer R., and J. Sleeman R. 1964. Glaebules, their definition, classification and interpretation. *J. Soil. Sci.* 15:66-78.
- Buck C., M. Langmaack, and S. Schrader. 2000. Influence of mulch and soil compaction on earthworm cast properties. *Appl. Soil Ecol.* 14:223-229.
- Bullock P., N. Federoff, A. Jongerius, G. Stoops, and T. Tursina. 1985. Handbook for soil thin section description. Wayne Research Publications, England.
- Bunt A., C. 1984. Physical properties of mixtures of peats and minerals of different particle size and bulk density for potting substrates. *Acta Horticulturae* 150:143-154.

- Bunt A., C. 1988. Media and mixes for container-grown plants. Second edition. Unwin Hyman Ltd. London. 309 p.
- Burés S. 1997. Sustratos. Agrotecnia. Madrid, España. 339 p.
- Burés S. 1998. Introducción a los sustratos. Aspectos Generales. *In: Tecnología de sustratos. Aplicación a la producción viverística, ornamental, hortícola y forestal.* Narciso Pastor Sáez. Coordinador. Ediciones de la Universidad de Leida. 19 p.
- Burés S. 1999. Sustratos. Ediciones Agrotécnicas S. L. Madrid. 220 p.
- Burés S.; A. Farmer M., P. Landau D., M. Ferrenberg A., and A. Pokomy F. 1993. Container media characterization by scanning electron microscopy and comparison with a Monte Carlo computer simulated medium. *Commun. Soil Sci. and Plant Anal* 24:2649-2659.
- Burés S.; P. Landau D., M. Ferrenberg, A., and A. Pokorny F. 1993. Monte Carlo computer simulation in horticulture: A model for container media characterization. *HortScience* 28:1074-1078.
- Burés S.; X. Martínez F.; and M. Llorca. 1988. Preliminary study of the application of parametric linear programming in formulation of substrate mixes. *Acta Horticulturae* 221:141-152.
- Burés S.; A. Pokomy F., P. Landau, D., and M. Ferrenberg A. 1993. Computer simulation of volume shrinkage upon mixing container media components. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 118:757-761.
- Burger D., J. Martín; D. Hodel, T. Lukaszewskj, S. Tjosvold, and S. Wagner. 1987. Water use in California's ornamental nurseries. *Calif. Agr.* 41(9-10):7-8.
- Chen Y., A. Banin, and Y. Ataman. 1980. Characterization of particles and pores, hydraulic properties and water-air ratios of artificial growth media and soils. *Proc. 5th Int. Congress of soilless culture.* Wageningen, The Netherlands. pp 63-82.
- Childs E., C. 1940. The use of soil moisture characteristics in soil studies. *Soil Sci.* 50:239-252.
- Chong C., R. Cline A., and D. L. Rinker. 1994. Bark and peat amended spent mushroom compost for container culture of shrubs. *HortScience* 29(7):781-784.
- Cabrera R., I. 1999. Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta. *Revista Chapingo-Serie Horticultura* 5(1):5-11.

- Cadden A., M. 1987. Comparative effect of particle size reduction on physical structure and water binding properties of several plant fibers. *Journal of Food Science*. 52:1595-1599.
- Calderon F. S., y F. Cevallos. 2003. Los sustratos. Bogotá, D. C. Colombia, S. A. Avda 13. No. 87-81.
- Canellas L. P., L. Olivares F., L. Okorokova-Facanha A., and R.Facanha A. 2002. Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H⁺-ATPase activity in maize roots. *Plant Physiol*. 130(4): 1951-1957.
- Carlson L., W. 1983. Guidelines for rearing containerized conifer seedlings in the Prairie Provinces. Info. Rep. NOR-X-214E. Edmonton, AB: Canadian Forestry Service, Northern Forest Research Centre. 64 p.
- Carmona E.; J. Ordovás; T. Moreno M.; M. Avilés, T. Aguado M., and C. Ortega M. 2003. Granulometric characterization and alteration during compositing of industrial cork residue for use as a growing media. *HortScience* 38:1242-1246.
- Castellan G., W. 1991. Fisicoquímica. Addison Wesley Longman. Publímex. D.F. México.
- Castillo A. E., H. Quarín S., and C. Iglesias M. 2000. Caracterización química y física de compost de lombrices elaboradas a partir de residuos orgánicos puros y combinados. *Agric. Téc. (Chile)*. 60(1):74-79.
- Castillo P. T., V. Volke H., L. Jiménez S., N. Estrella Ch., C. Ortiz S. y H. Santoyo C. 2005. Formulación de proyectos productivos con base en un diagnóstico del medio físico y su potencial productivo, y socioeconómico de las unidades familiares de producción, en agricultura de subsistencia. *In: Agricultura, Ganadería, ambiente y desarrollo sustentable*. Tornero C. M. A., Silva G. S. E., Pérez A. R. y Bonilla F. N. (Eds.). Publicación especial de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México. pp 107-141.
- Cecconi M., and G. Viggiani. 1998. Physical and structural properties of soft rock. *Proceedings of the Second International Symposium on Hard Soils-Soft Rocks*. Naples, Balkama. Vol. 1:85-91.
- Cosío C., y M. Fernández. 1997. Aproximación de los requerimientos hídricos de portainjertos de palto (*Persea americana* Mill.) cv. Mexícola Taller de Licenciatura. Quillota, Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Agronomía. 41 p.
- Daniels R. B., and R. Hammer D. 1992. *Soil Geomorphology*. John Wiley & Sons. Inc. U. S. A.

- Daniels W. L., and D. Wright, R. 1988. Cation exchange properties of pine bark growing media as influenced by pH, particle Size, and cation species. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 113(4):557-560.
- Da Silva F. F., R. Wallach, and Y. Chen. 1993. Hydraulic properties of *Sphagnum* peat moss and tuff (scoria) and their potencial effects on water availability. *Plant and Soil.* 154:119-126.
- De Boodt M., and N. De Waele. 1968. Study on the physical properties of artificial soils and the growth of ornamental plants. *Pedologie XVIII (3):275-300.*
- De Boodt M., and O. Verdonck. 1972. The physical properties of the substrates in horticulture. *Acta Horticulturae* 26:37-44.
- De Boodt M.; O. Verdonck, and I. Cappaert. 1974. Method for measuring the waterrelease curve of organic substrates. *Acta Horticulturae* 37:2054-2062.
- De Paepe P. 1991. Principles of petrology. International Training Center. Ghent Belgium.
- Drees R., L. Wilding P., N. Smeck E., and A. Senkayi L. 1989. Silica in soils: Quartz and disordered silica polymorphs. *In* j. B. Dixon and S. B. Weed (ed.) *Minerals in Soil Environments.* 2nd ed. S.S.S.A. Book Serv. No. 1 S. S.S.A., Madison, Wi. pp: 913-974.
- Edwards C., and Steele J. 1997. Using earthworm systems. *Biocycle.* 63-64. Disponible en: <http://gmv.fdt.net/~windle/refrence/july97-1.htm>. Fecha de recuperación: 20 de febrero de 2000.
- Edwards C., A. 1998. The use of earthworms in the breakdown and management of organic wastes. *In:* Edwarda, C. A. (Ed.) *Earth-worm Ecology* CRC. Press, Boca Raton, FL. pp: 327-354.
- Evans M. R., and S. Konduru. 1996. Source variation in physical and chemical properties of coconut coir dust. *HortScience* 31(6):965-967.
- Farina E. 1989. The cultivation of *Lisianthus* (*Lisianthus rusellianus* Hook) for cut flower in annual or biennial cycle. Effect of planting date and plant age on productivity. *Acta Horticulturae* 252.
- Finney J., L. 1983. Structures and properties of granular materials; Guidelines from modellind studies of liquids and amorphous solids. pp: 19-39. *In* M. Shahinpoor (ed.), *Advances in macechanics and the flow of granular materials.* Gulf, Houston.
- Fisher R. V., and H. Schmincke V. 1984. *Pyroclastic rocks.* Berlin: Springer-Verlang.

- Fonteno W., C. 1993. Problems and considerations in determining physical properties of horticultural substrates. *Acta horticulturae* 342:197-204.
- Fonteno W. C., K. Cassel D., and A. Larson R. 1981. Physical properties of three container media an their effect on poinsettia growth. *Journal American Society for Horticultural Sciences* 106(6):736-741.
- Formenti Y., and H. Druitt T. 2003. Vesicle connectivity in pyroclasts and implications for the fluidisation of fountain-collapse pyroclastic flows. *Monteserrat (West Indies). Earth and Planetary Science Letters*. Vol. 214:561-574.
- Friedman G., M. 1958. Determination of sieve-size distribution from thin section data for sedimentary petrological studies. *J. Geol.* 66:394:416.
- Futura T., R. Coleman; T. Mock, A. Marsh, R. Branson, and Strohman. 1976. Drip irrigation for plants grown containers. *California Agriculture* 30 (3):16-17.
- Gabriels R., W. Van Keirsbulck, and H. Engels. 1985 Computer a ideal chemical analisys and fertilizer recommendation of composts and other substrates. *Acta Horticulturae* 172:245-249.
- García O., G. Alcántar, I. Cabrera R., F. Gavi y V. Volke. 2001. Evaluación de sustratos para la producción de *Epipremnum aureum* y *Spathiphyllum wallisii* cultivada en maceta. *Terra* 19:249-258.
- Ghosh M., N. Chattopadhyay G., and K. Baral. 1999. Transformation of phosphorus during vermicomposting. *Biores. Technol.* 69: 149-154.
- Gillman G., P. 1979. A proposed method for the measurement of exchange properties of highly weathered soils. *Australian Journal Soil Research* 17:129-139.
- Gladon D. 1988. Amendments and media. *Container grower:news and notes*. Fall 1988. Ames. IA: Iowa State University of Science and Technology. Department of Forestry. 10 p.
- Gould H., and J. Tobochnik. 1988. An introduction to computer simulation methods. Applications to physical systems. Addison-Wesley, reading, Mass.
- Gras R., and I. Agius. 1982. Quelques propriétés physiques des subtrats horticoles. *Revue Horticole* 230.51-53.
- Gruda N., and W. Schnitzler H. 2004. Suitability of wood fiber substrate for production of vegetable transplants. I. Physical properties of wood fiber substrates. *Scientia Horticulturae* 100:309-322.

- Gunnlaugsson B. 1995. Pumice as environment-friendly substrate a comparison with rockwool. *Acta Horticulturae* 401:131-136.
- Halevy A., and A. Kofranek. 1984. Evaluation of *Lisianthus* as a new flower crop. *HortScience* 19(6) 845- 847.
- Handreck K., A. 1983. Particle size and the physical properties of growing media for containers. *Commun in Soil Sci. Plant Anal.* 14:209-222.
- Handreck K. A., and Black, N. D. 1984. Growing media for ornamental plants and turf. Kensington, NS, Australia: New South Wales University Press. 401 p.
- Havis, J. R., and W. Hamilton W. 1976. Physical properties of container media. *Journal of Arboriculture* 2(7):139-140.
- Heiskanen J. 1995. Water status of sphagnum peat and a peat- perlite mixture in containers subjected to irrigation regimes. *Hort Science* 30(2):281-284.
- Hellum A., K. 1975. Selecting peat for rearing coniferous container seedlings. *Forestry Chronicle* 51:200-202.
- Hoitink H. A. J., and A. Kuter, G. 1986. Effects of composts in growth media on soil borne pathogens. pp 289-306. *In: Chen, Y. and Avnimelech, Y. (eds.). The role of organic matter in modern agriculture.* Martinus Nijhoff Publishers. Dordrecht, Netherlands.
- Howard B. 1979. *Growers Chronical and Hort. Trade J.* Nov. 9:27.
- Jaimes J., G. 1994. Producción de plántula de brócoli (*Brassica oleracea* var. *Italica*) en contenedores con soluciones nutritivas y sustratos especiales bajo invernadero. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Fitotecnia.
- James B., L. 1987. Propagation media: what a grower needs to know. *Combined Proceedings, International Plant Propagators' Society Meeting* 36:396-399.
- Jaroslav S., K. 1990. Minerals. Praga: Ed. Jusaeta. pp 7-27.
- Johnson G. R., and R. Olhoeft, G. 1984. Density of rock and minerals. *In: Handbook of Physical Properties of Rocks (vol.3), Carmichael, S. R. Ed. CRC Press, Boca Raton, F.L.* pp 1-38.
- Kang, J. Y., Lee, H. H., and Kim, K. H. 2004. Physical and chemical properties of organic horticultural substrates used in Korea. *Acta Horticulturae* 644:231-235.

- Kirkman J., H. 1976. Clay mineralogy of Rotomahana sandy loam soil, North Island, New Zeland, New Zeland. *N.Z.J. Geology Geophys.* 19:35-41.
- Klug C., V. Cashman K., and R. Bacon C. 2002. Structure and physical characteristics of pumice from the climatic eruption of Mt. Mazama (Crater Lake), Oregon. *Bull. Volcanol.* 64:486-501.
- Konduru S., R. Evans M., and H. Stamps R. 1999. Coconut husk and processing effect on chemical and physical properties of coconut coir dust. *HortScience* 34:88-90.
- Ku C., and D. Hershey. 1991 Leachate eléctrica! conductivity and growth of potted poinsettia with leaching fractions of 0 to 0.4. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 116(5):802-806.
- Landis T., D. 1990. Containers: Types and Functions. *In* Landis, T. D.; Tinus, R. W.; McDonald, S. E.; Barnett, J. P. *The Container Tree Nursery Manual. Volume 2. Agric. Handbk. 674.* Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service: pp: 41-89.
- Lemaire F. 1993. Emploi des matières organiques comme sustrat dans les cultures hort sol. *PHM Revue Horticole* 336:10-17.
- Lemaire F. 1995. Physical, chemical, and biological properties of growing medium. *Acta Horticulturae* 39.
- Maerow A.,W. 1994. Growth of two subtropical ornamentals using coir (coconut mesocarp pith) as a peat substitute. *HortScience* 29(12):1484-1486.
- Manorek D. M., D. Studebaker, and B. Oberly. 1986. Improving media aeration in liner and container production. *International Plant Propagators Society Combined Proceeding* 35:591-597.
- Martínez F. X., J. Valero, y M. Viñals. 1992. Predicción del contenido en agua de los sustratos en condiciones de capacidad de contenedor. *Actas de las I. Jornadas de Sustratos. Sociedad Española de Ciencias Horticolas.*
- Martínez F.X., N. Sepó and J. Valero. 1997. Physical and physicochemical properties of peat-coir mixes and the effects of clay-material addition. *Acta Horticulturae* 450:39-46.
- Martínez D. A., A. Landini, y M. Svartz, H. 2006. Propiedades físicas e hidráulicas de perlita en cultivo de rosas y sus variaciones temporales. *Cienc. Suelo.* 24 (2):177-182. ISSN 1850-2067.

- MAPA. 2006. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Sustratos de cultivo para ornamentales. <http://www.mapa.es/es/agricultura/pags/sustrato>. Verificada en enero de 2007. 6:273-284.
- Mastalerz J. 1977. The greenhouse environment. Chapter 6. Growing media. John Wiley & Sons. New York, U.S.A.
- Matking O. A., A. Chandler P. 1957. The U. C. Type soil mixes. *In*: Baker, Kenneth F., ed. The U. C. System for producing healthy container-grown plant. Ext. Serv. Man. 23. Parramatta, Australian Nurserymen's Association (First printed by the University of California Agricultural Experiment Station): 68-85.
- Meerow A., W. 1994. Growth of two subtropical ornamentals using coir (coconut esocarp pith) as a peat substitute. *HortScience* 29(12):1484-1486.
- Meggelen-Laagland I. 1995. Golden future for coco substrate. *Floraculture International*. International Horticulture Publications Co. Batavia, Illinois. U.S.A.
- Melgares de Aguilar C., J. 1997. El Cultivo de *Lisianthus* en maceta. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente de la Región de Murcia. Plaza Juan XXIII No. 4.
- Michiels, P., R. Hartman R. and C. Coussens. 1993. Physical properties of peat substrates in ebb/flood irrigation system. *Acta Hort.* 342:205-219.
- Milks R.; C. Fonteno W. and A. Larson R. 1989a. Hydrology of horticultural substrates: Imathematical models for moisture characteristics of horticultural contains media. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 114:48-52.
- Minge D.W., and F. Mumpton A. 1989. Zeolites in soils. *In*: J.B. Dixon and Weed (ed) *Minerals in Soil Environments*. 2nd ed. S.S.S.A. Book ser. No. 1 S. S.S.A., Madison, Wi. p. 873-911.
- Mollitor R., H. Faber, A. Marutzky R. and S. Springer. 2004. Peat substitute on the basis of recycled wood chipboard. *Acta Horticulturae* 644:123-130.
- Moore G. 1988. Perlite: start to finish. *International Plant Propagators' Society Combined Proceedings* 37:48-52.
- Nappi P. 1993. Compost as growing medium chemical physical and biological aspects. *Acta Horticulturae* 342: 249-256.

- Nelson G., C. 1978. Physical properties of greenhouse container media. Ms. Thesis. Colorado State University. Fort Collins.
- Nelson P., V. 1991. Greenhouse operation and management. Chapter 5 root media. Prentice- Hall, Inc.
- Noguera P. 1997. Physical and chemical properties of coir waste and their relation to plant growth. *Acta Horticulturae*. ISHS.
- Noguera P., M. Abad, R. Puchades, V. Noguera, and A. Maquieira. 2000. Coconut coir waste, a new and viable ecologically-friendly peat substitute. *Acta Horticulturae* 517:279-288.
- Noguera P., M. Abad, R. Puchades, A. Maquieira, and V. Noguera. 2003. Influence of particle size on physical and chemical properties of coconut coir dust as container medium. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 34:593-605.
- Ohkawa K., and E. Sasaki. 1999. *Eustoma* (Lisianthus) Its past, present, and future. *Acta Horticulturae* 482:423-427.
- Oleksiy V., J. Chen, G. Hall S., and J. Khinast G. 2006. Efficient surface functionalization of zeolites via esterification. *Microporous and Mesoporous Materials*. 101-108.
- Ordovás J., E. Carmona, C. Ortega M. y T. Aguado M. 1997. Características físicas de sustratos de corcho y turba en macetas tras 2 y 5 meses de cultivo. *Actas de Horticultura* 18: 464-467.
- Orozco R., M. Marfa, and S. Burés 1995. Water status of graded perlites. *Acta Horticulturae* 401:137-143.
- PanAmerican Seed. 2003. Pot & Bedding *Lisianthus*. West Chicago Illinois, USA. Ball Horticultural Company.
- Pape Th., and D. Lager. 1994. Manual for soil descriptions and classification. Department of Soil Science and Geology. Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands.
- Paul J., and C. Lee. 1976 . Relations between growth of chysantemuns and aeration of various container media. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 101(5):500-503.
- Peck K. 1984. Peat moss and peats. *Hummert's Quarterly* 8(3):4-5.

- Pagés M., O. Verdonck., and M. De Boodt. 1981. Estudio comparativo de las propiedades físicas de los 'pequeños bloques prensados' y los sustratos más comunes en el cultivo hortícola. *Anales INIA* 14:251-65.
- Pereira M. G., and A. Zezzi-Arruda M. 2003. Vermicompost as a natural adsorbent material characterization and potentialities for cadmium adsorption. *J. Braz. Chem. Soc.*, 14(1):39-47.
- Pereira M. G., and . Zezzi-Arruda M. 2004. Preconcentration of Cd (II) and Pb (II) using humic substances and flow systems coupled to flame atomic absorption spectrometry. *microchim. Acta*: 215-222.
- Perlite Institute. 1983. Perlite. Typical chemical and physical properties of perlite. Tech. Data sheet. New York. 2 p.
- Penninck R., O. Verdonck, and M. De Boodt. 1985. Different materials which can be used in compots. *Acta Horticulturae* 172:31-38.
- Pergola G. 1992. The need for vernalization in *Eustoma russellianum*. *Scientia Horticulturae* 51 123-127.
- Pokorny F., A. 1981. Rx media -A concept for container plant production. ASAE paper No 81 -1089. ASAE St. Joseph. Michigan. 149085.
- Pokorny F. A., G. Gibson P., and G. Dunavent M. 1981. Predicting particle size distribution of bark/sand media torn analysis or media components. *Hort. Sci.* 21(3):677.
- Pokorny F. A., and B. Henny K. 1984. Construction of a milled pine bark and sand potting medium from component particles I. Bulk Density: A tool for Predicting Component Volumes. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 109(6):770-773.
- Pokorny F. A., and Y. Wetzstein H. 1984. Internal porosity, water availability, and root penetration of pine bark particles. *HortScience* 19:447-449.
- Pokorny F. A., G. Gibson P., and G. Dunavent M. 1986. Prediction of bulk density of pine bark and/or sand potting media form laboratory analysis of individual components. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 111(1):8- 11.
- Pokorny F., A. 1987. Availablewater and root development within the micropores of pine bark particles. *Journal of Environmental Horticulturae.* 5(2):89-92.
- Prasad M. 1995. Physical and chemical properties of fractionated. Peat. *Acta Horticulturae* 342:257-264.

- Prasad M., and D. Ní Chualáin. 2004. Relationship between particle size and air space of growing media. *Acta Horticulturae* 648:161-166.
- Pryce S. 1991. *The Peat alternatives manual*. Friends of the Earth, London (UK).133 pp.
- Puustjarvi V. 1974. Physical properties of peat used in horticulture. *Acta Hort.* 37:1922-1929.
- Puustjarvi V., and A. Robertson R. 1975. Physical and chemical properties. *In: Peat in horticulture*. London: Academic Press. 170 p.
- Puustjärvi V. 1982. The size distribution of peat particles, pp. 33-47. *In: Peat and plant yearbook*. V. Puustjärvi, T. A. Ilmonen, A. Suoninem, M. Voutilainen and M. Korhonen (eds.). Assoc. Finnish Peat Industries. Helsinki, Finland.
- Raghavedra S. N., S. Ramachandra R., N. Rastogi K., S. Raghavarao M., K. Sourav, and R. Tharanathan N. 2006. Grinding characteristics and hydration properties of coconut residue: A source of dietary fiber. *Journal of Food Engineering* 72:281-286.
- Raviv M., Y. Chen, Z. Geler, S. Medina, E. Putievski , Y. Inbar. 1984. Slurry produced by methanogenic fermentation of cow manure as a growth medium for somehorticultural crops. *Acta Horticulturae* 150: 563-573.
- Raviv M., Y. Chen; and Y. Inbar. 1986. Peat and peat substitutes as growth media for container-grow plants. *In: Y. Chen y Y. Avnimelech (eds). The role of organic matter in modern agriculture*. Martinus Nijhoff Publishers. The Netherlands.
- Raviv M., R. Wallach, A. Silber, and A. Bar-Tal. 2002. Substrates and their analysis. *In: Hydroponic production of vegetable and ornamental*. D. Savvas and H. Passam (eds). Embryo publications. Athens, Greece. pp 25-101.
- Raviv M., R. Wallach and J. Blom. 2004. The effect of physical properties of soilless media on plant performance-a review. *Acta Horticulturae* 644:251-259.
- Rees L., V. C. 1980. Zeolite chemistry and catalysis. ACS Mong.171. Am. Chem. Soc., Washington D. C.
- Regan R. 1991. Crop water requirements of container- grow plants. *The International Plant Propagators' Society. Combined proceedings* 41:229-231.
- Reinikainen O. 1993. Choice of growing media for pot plant. *Acta Horticulturae* 342:357-360.

- Reis M. 1995. Evaluation of composed pine bark and carob pods as components for horticultural substrates. *Acta Horticulturae* 401:243-249.
- Robertson J. A., F. Monredon, P. Dysseleer, F. Guillon, R. Amado, and F. Thibault J. 2000. Hydration properties of dietary fiber and resistant starch: a European collaborative study. *Lebensmittel Wissenschaft-und-Technologie* 33:72-79.
- Romero C. 1979. Técnicas de programación y control de proyectos. Ed. Pirámide. Ramon de la Cruz, 67. Madrid. Spain.
- Salisbury B. F. y C. Ross W. 1994. Fisiología Vegetal. Grupo Editorial Iberoamericana S. A. de C. V. 759 p.
- Segura C., M. A. 2003. Escalas de observación en los estudios de génesis de suelos: Caso de los suelos de humedad residual. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. México. 120 p.
- Scharpf H., C. 1997. Physical characteristics of peat and the growth of pot plant. *In*. Schmilewski, G. K. (Ed.). Peat in Horticulture- Its Use and Sustainability, Proceedings of the International Peat Conference. November 2-7, 1997. pp 43-52.
- Shechter C., S. 1989. Theoretical investigation of the motion of ground waters. 19th Annu. Rpt. U. S. Geological Survey. Washington, D.C. Government Printing Office 19:301-384.
- Silber A., and M. Raviv. 1996. Effects on chemical surface properties of tuff by growing rose plants. *Plant and Soil*. 186:353-360.
- Smith W., O. 1943. Densidad of soil solids and their genetical origin. *Soil Science* 56:263-273.
- Smith G. A., and D. Smith R. 1985. Specific gravity characteristics of recent volcanoclastic sediment: Implications for sorting and grain size analysis. *Journal of Geology* 93:619-622.
- SNIIM. 2007. Información de Mercados en México. ASERCA.
- Southard A. R., and P. Kolesar T. 1978. An exotic source of extractable potassium in some soil of Northern Utah. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:528-530.
- Soto G., y C Muñoz. 2002. Consideraciones teóricas y prácticas sobre el compost y su empleo en la agricultura orgánica. *Manejo Integrado de Plagas (Costa Rica)* (65):123-129.

- Spomer L., A. 1975. Optimizing container soil amendment: The "Threshold Proportion" and prediction of porosity. Hort. Sci. 9 (6): 532-533.
- Sumer M. 2000. Handbook of Soil Science. CRC. Press, New York. USA.
- Swanson B., T. 1989. Critical physical properties of container media. American Nurseryman 169 (11):59-63.
- Tamari S., D. Samaniego-Martínez, I. Bonota, E. Bandala R., and V. Ordaz-Chaparro. 2005. Particle density of volcanic scoria determined by water picnometry. Geotechnical Testing Journal 28(4):1-6.
- Tanaka U., and K. Kyuma. 1992. Quantification of morphological characteristics of crust by thin section-image analyzing method (TS-IA method). Soil Sci. Plant Nutr. 38:369-373.
- Toledo J. 1996. Aproximación a los requerimientos hídricos en vivero portainjertos de paltos (*Persea americana* Mill.) cv. Mexícola. Taller de Linceiatura. Quillota, Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Agronomía. 23 p.
- Unver I., Y. Ataman, and N. Munsuz. 1983. Water relation characteristics for some substrates used in Turkey. Acta Horticulturae 150:161-168.
- Velásquez R., J. M. 1995. Evaluación de *Quercus crassioes* en vivero bajo diferentes tipos de sustrato e intensidades de luz. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales.
- Ventura F., J. 2001. Evaluación agronómica de un sustrato alternativo, cáscara de almendra con fines de producción hortícola en comparación con el polvo de coco. Universidad de Almería. 123 p.
- Verdonck O., and I. Cappaer. 1978. Growth experiments with barkcompost. Acta Horticulturae 82:55-57.
- Verdonck O., R. Penninck, and M. De Boodt. 1983. The physical properties of different horticultural substrates. Acta Horticulturae 150:161-167.
- Verdonck O., R. Penninck and M. De Boodt. 1984. The physical properties of different horticultural substrate. Acta Horticulturae 150:155-160.
- Verdonck O., and R. Penninck. 1986. Air content in horticultural substrates. Acta Horticulturae 178:101-105.

- Verdonck O., and R. Gabriels. 1988. Substrate requirements for plants. *Acta Horticulturae* 221:19-23.
- Verdonck O. 2004. The influence of the particle sizes on the physical properties of growing media. *Acta Horticulturae* 644:99-101.
- Wada K., and M. Harward T. 1974. Amorphous clay constituents of soil. *Adv. Agron.* 26:211-260.
- Wallach R., F. Da Silva F., and Y. Chen. 1992. Hydraulic characteristics of tuff (scoria) used as a container medium. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 117(3):415-421.
- Ward J., C. Bragg N., and J. Chambers B. 1987. Peatbased composts: their properties defined and modified to your needs. *International Plant Propagators' Society Combined Proceedings* 36:288-292.
- Warncke D., D. 1986. Recommended test procedure for greenhouse growth media. *In: Recommended chemical soil test procedures for the North Central Región. Bulletin No. 499. North Dakota Agricultural Experiment Station.*
- Wesley D., L. 2001. Determination of specific gravity and void ratio of pumice materials. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ.* 24 (4):418-422.
- Whitham A.G., and S. J. Spaks R. 1986. Pumice. *Bulletin of Volcanology.* 48:209-223.
- Wilson G., C. S. 1985. Effects of additives to peat on the air and water capacity. *Acta Horticulturae* 172:207-209.
- Winsor G., W. 1990. Soilless culture for horticultural crop production. *FAO plant production and protection paper* 101 p.
- Withcomb C., E. 1988. *Plant production in containers.* Lacebark Publications Inc. Stillwater, Oklahoma.
- Xian-Tao H., J. Traina S., and J. Logan T. 1992. Chemical properties of municipal solid waste compost. *J. Environ. Qual.* 21:318-329.
- Zarate S., J. 1995. Evaluación de cinco sustratos y dos cultivares de crisantemo (*Chasantemum morifolium*) para maceta bajo invernadero en la región de Texcoco, Edo. México. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Fitotecnia.
- Zamora M. B. P., P. Sánchez G., V. H. Volke H., D. Espinosa V y A. Galvis S. 2005. Formulación de mezclas de sustratos mediante programación lineal. *Interciencia.* Vol. 30(6):365-369.

Zucconi F., and M. Bertoldi M. 1987. Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste. Pp 30-50. *In*: Bertoldi, M, L'Hermite, P. and Zucconi, F. (Eds.). Compost: Production, Quality and Use. Elsevier Applied Science. New York, NY, USA.