

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA AGRICOLA**



**DISEÑO, CONSTRUCCION Y EVALUACION HIDRAULICA
DE CAPSULAS POROSAS DE ARCILLA CON FINES DE RIEGO**

POR:

**VICTOR MANUEL HENRIQUEZ HERNANDEZ
LUIS ERNESTO NOLASCO AVALOS
IVAN ERNESTO PEREZ BARRAZA**

**REQUISITO PARA OPTAR AL TITULO DE:
INGENIERO AGRONOMO**

SAN SALVADOR , JUNIO DE 1997

Ej. 1

1354

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR



RECTOR : DR. JOSE BENJAMIN LOPEZ GUILLEN

SECRETARIO GENERAL: LIC. ENNIO ARTURO LUNA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS

DECANO : ING.AGR. RODOLFO MIRANDA GAMEZ

SECRETARIO : ING.AGR. LUIS HOMERO LOPEZ

GUARDADO

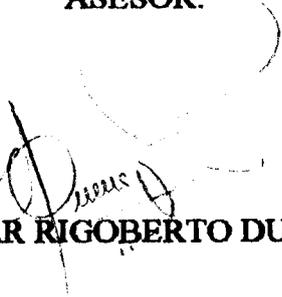
Done do por Secretaris, 19.12.1987

JEFE DEPARTAMENTO DE INGENIERIA AGRICOLA:



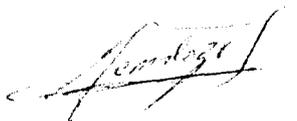
ING.AGR. CARLOS ARMANDO VILLALTA RODRIGUEZ

ASESOR:

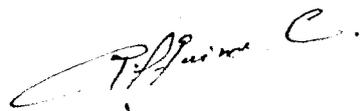


ING.AGR. OSCAR RIGOBERTO DUEÑAS PEÑATE

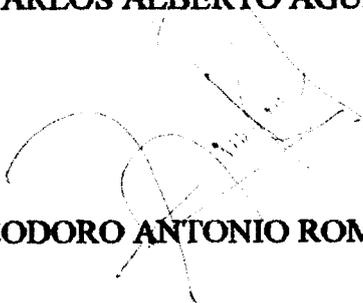
JURADO EXAMINADOR:



ING.AGR. ALIRIO EDMUNDO MENDOZA



ING.AGR. CARLOS ALBERTO AGUIRRE CASTRO



ING.AGR. TEODORO ANTONIO ROMERO ROMERO

RESUMEN

El Salvador como otros países en desarrollo y con una alta densidad poblacional, produce alimentos en época seca mediante la aplicación de técnicas de riego. Esto nos conlleva a investigar métodos de riego aun no muy conocidos en nuestro país. El presente estudio consistió en diseñar, construir y evaluar hidráulicamente cápsulas porosas de arcilla con fines de riego.

El ensayo se realizó en cuatro fases, utilizando diferentes procesos y metodologías; fase de diseño realizada en talleres de cerámica artesanal ubicados en el municipio de Ilobasco, departamento de Cabañas; fase de construcción realizada en el taller de cerámica técnica en el municipio de Mejicanos, departamento de San Salvador; fase de laboratorio en los laboratorios de el departamento de Química Agrícola y departamento de Suelos de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, y fase de evaluación en el Propagador del departamento de Suelos de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, estas fases se desarrollaron desde el mes de mayo de 1994 a diciembre de 1996. Durante el ensayo se utilizaron cuatro formas geométricas para el diseño de la cápsula, de las cuales tres se analizaron en forma práctica (cilindro, cono truncado y ovoide) y una en forma analítica (esfera); seleccionándose la forma ovoide por presentar mejores características en su desmoldado, mejor distribución de las fuerzas de tensión y adecuación de protuberancias tubulares interconectoras cuyas dimensiones promedio de las cápsulas son: altura de 13.18 cm, radio de 9.97 cm, espesor de pared de 0.397 cm, volumen de 594.68 cc.

En el proceso de construcción se utilizaron tres métodos los cuales variaban de acuerdo al material utilizado, encontrándose el torno de alfarero y repujado en moldes de yeso para la construcción de cápsulas con materiales tipo terracota (suelo arcilloso con ceniza volcánica) además el método de vaciado de barbotina en moldes de yeso para materiales de tipo caolín como la loza y porcelana; seleccionándose este último por producir cuerpos cerámicos de una sola pieza y

con buena uniformidad en el espesor de pared. Los materiales utilizados en la construcción fueron: suelo arcilloso (arcilla de Ilobasco), ceniza volcánica (tierra blanca) y arcilla de loza; como también diferentes aditivos y proporciones como: arena en 5, 10, 15 y 20 %; carbón de madera en 5, 10, 15 y 20%; harina de trigo en 10, 15, 20 y 25%; estiércol de bovino en 20%, estos mezclados con suelo arcilloso y ceniza volcánica con las formas geométricas de cono truncado y cilindro; además se utilizo estiércol de bovino en 20%, carbonato de calcio en 20% y aserrín de madera en 10, 15 y 20%, estos con arcilla de loza y con la forma geométrica ovoide. Presentando mejores resultados el aserrín de madera como aditivo para porosidad, y la arcilla de loza como material.

La evaluación hidráulica se realizo con cápsulas construidas con arcilla de loza pura y arcilla de loza con aserrín en proporción del 10, 15 y 20% con la forma geométrica ovoide. Esta evaluación se realizo en un permeámetro de nivel constante y con diferentes presiones hidrostáticas (0.25, 0.50, 0.75 y 1.00 m) demostrándose que las liberaciones de agua de las cápsulas en medio acuoso obedecen a la ley de Darcy: $K = (2.E.V)/(t(s_1 + s_2). AH)$, donde K es la conductividad hidráulica, E es el espesor de las paredes de la cápsula, V es el volumen, t es el tiempo, s_1 y s_2 es la superficie externa e interna de la cápsula y AH es la altura de la carga hidráulica; obteniéndose rangos de conductividad hidraulica de 0.0088 hasta 0.0841 cm/hr y liberaciones de agua de 2.88 hasta 66.36 lts/día presentando caudales especificos de 0.01747 hasta 0.084148 lts/día/cm² obteniéndose estos últimos con la formula $QE = Qm / Sp$, donde QE es el caudal especifico en lts/día/cm², Qm es el caudal máximo y Sp es la superficie promedio ($s_1 + s_2$); teniéndose que las cápsulas presentaron un volumen promedio de 594.68 cc. Las liberaciones de agua de las cápsulas obedecen a un modelo matemático de regresión lineal: $y = a + bx$, donde a y b son coeficientes de regresión y x es el valor de la carga hidráulica en mt.

En la evaluación del bulbo húmedo en diferentes texturas de suelo (franco arenoso, franco limoso y franco arcillo limoso) con una carga hidrostática de 0.37 m y un caudal promedio de 5.0

lts/día y con la mezcla 100:0; se obtuvo que el desarrollo del bulbo húmedo obedece a la aplicación de un modelo matemático de predicción de tipo cuadrático semilogarítmico: $y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_1^2$; donde y es el valor predicho del diámetro humedecido, $x_1 = \log x$ y x es el valor del tiempo, a_0 , a_1 y a_2 son coeficientes de regresión; este modelo matemático obedece también al contenido de humedad del bulbo donde y sería el valor predicho del contenido de humedad, de ahí que el contenido de humedad de los bulbos para las tres texturas de suelo se encuentra clasificada como agua fácilmente aprovechable, mostrando esta estar menos retenida en la textura franco arenosa y más retenida en la textura franco arcillo limosa. Obteniéndose diámetros de bulbo húmedo de 56.0 cm con tiempo de 27.60 hrs en la textura franco arenosa y de 54.0 cm con tiempo de 42.70 hrs en la textura franco limosa y 68.0 cm con tiempo de 187.65 hrs en el franco arcillo limoso.

Teniéndose que el costo para la producción de cápsulas porosas de arcilla es de $\$$ 2.82, y que el 50.35% del costo lo representa su principal componente que es la arcilla de loza.

En conclusión se tiene que la forma geométrica ovoide es el diseño apropiado para las cápsulas, que la arcilla de loza es el material idóneo para su construcción y que el aserrín de madera es el aditivo para proporcionar porosidad a estas, y que el método para su construcción es el vaciado de barbotina en molde de yeso; y el método de riego por cápsulas porosas de arcilla es la premisa para futuras investigaciones que podrán tener lugar a nivel de invernadero y cultivos bajo techo de buena rentabilidad y otros.

AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo fue gracias a la colaboración de muchas personas que colaboraron directa o indirectamente para su finalización.

AL ASESOR :

Ing. Agr. Oscar .R . Dueñas Peñate por su apoyo desinteresado en la realización de este trabajo.

AL JURADO CALIFICADOR:

Ingenieros Agrónomos: Alirio.E.Mendoza, Carlos. A.Aguirre, Teodoro.A.Romero, por su aporte al trabajo.

AL PERSONAL DOCENTE Y TRABAJADOR DE LA FACULTAD:

Chele Tejada, Chele Inmendiá , Lupita, Popochon, Balmore Pérez , Quezada Muñoz, Elmer Hernandez, Dra. Cañas, Chiricuto, Sr. De la Carpintería, A Napo, Monico,

Ing. Lemus(Dpt. Matemáticas), El macho, Ala Junta Directiva ,Al negro y otros que colaboraron.

A NUESTROS AMIGOS:

Que de manera desinteresada nos brindaron su apoyo: Miguel Angel Matus, José Roberto Moreno, A Nicolas Méndez (Hijo), Cesar dela Cerámica Ceren, A los artesanos de Ilobasco, Víctor Arnoldo Cornejo, Oscar Nerio y Eduardo Flores, Sra. De Parras, Gracias.

A TODOS GRACIAS

DEDICATORIA.

Este trabajo es la finalización de un pedacito mas en mi vida, el cual es el esfuerzo no solo mio sino también de todas aquellas personas que me brindaron una mano de apoyo y que otros a través de su critica me elevaron el autoestima, a todos ellos dedico este trabajo.

A MI DIOS JEHOVA Y SU HIJO:

por darme sabiduría, inteligencia, y conocimientos necesarios por siempre a el sea la gloria, honra y honor.

A MIS PADRES:

Antonio Hernandez y Francisca Henriquez por brindarme su amor y comprensión en todo momento.

A MI ESPOSA:

Por su amor y comprensión que ayudaron a culminar mis estudios.

A MIS HIJOS:

Libny y Astrid que son el motivo de este y muchos esfuerzos mas.

A MIS HERMANOS:

Por darme los ánimos que ayudaron a culminar mis estudios.

VICTOR.M.HENRIQUEZ.H.

DEDICATORIA

Al Dios vivo y materializado en los mas pequeños del pueblo salvadoreño, por darme la luz de sabiduría y entendimiento.

A MIS PADRES:

Luis Ernesto Nolasco y Mariana Avalos por su amor, comprensión, esfuerzos, consejos, paciencia y entrega en todos los momentos en que los necesite y por ser además de mis padres mis amigos.

A MI ESPOSA:

Elisa Funes por su amor y comprensión y por darle mas sentido a mi vida. Gracias "india" como yo.

A MI HIJA:

Mariana Elisa con mucho amor y por ser el eje sobre el cual gira toda mi vida.

A MIS HERMANOS :

Patricia del Carmen y en especial a José Augusto por hacerme sentir mas de un paso al andar conmigo.

A MIS SOBRINOS:

Alejandro Ernesto, Rafael Alexander, Sarita Patricia ,con mucho cariño y como muestra de lo conseguido con el esfuerzo de muchos.

A MI SUEGRA.

Bernarda de Funes por el empuje y entusiasmo desinteresado que siempre me brindo.

LUIS . E. NOLASCO AVALOS

DEDICATORIA

A LA SANTISIMA TRINIDAD .

Por quien todo es posible, por haberme concedido sabiduría , fortaleza de espíritu, entendimiento, paciencia y perseverancia.

A LA MADRE SANTISIMA :

Virgen María , por su infinito amor.

A MIS PADRES:

Pedro Alonso Pérez Villatoro y Carmen Barraza de Pérez, por su amor , esfuerzo tesonero y sacrificio puesto a lo largo de todos los años de mi vida.

A MI ABUELA.

Mercedes Barraza ,por su sabido consejo y por mostrarme el camino a seguir.

A MI ESPOSA Y MIS HIJOS:

Elia Guadalupe , por su amor y comprensión; Ivan Alonso y al que aun no ha llegado, por ser la razón de mi esfuerzo.

A MIS HERMANOS :

Pedro Alonso , Soraya del Carmen , Verónica María y Carolina Mercedes , por el apoyo y animo que me han brindado

IVAN ERNESTO PEREZ BARRAZA

INDICE

	Pág.
RESUMEN.....	iv
AGRADECIMIENTOS	vii
DEDICATORIA.....	viii
INDICE DE CUADROS	xxi
INDICE DE FIGURAS	xxiii
1. INTRODUCCION.....	1
2. REVISION DE LITERARTURA.....	2
2.1 Generalidades sobre el riego	2
2.1.1 El papel del agua en las plantas.....	2
2.1.2 Relación suelo-planta-agua.....	2
2.1.3 Concepto de riego	3
2.2 Desarrollo del riego	3
2.2.1 El riego en la historia.....	3
2.2.2 El riego en El Salvador	4
2.3 Métodos de riego	4
2.3.1 Riego superficial	5
2.3.2 Riego por aspersion o aéreo	5
2.3.2 Riego por aspersion o aéreo	5
2.3.3 Microirrigación.....	6
2.3.4 Riego subterráneo o subsuperficial.....	6
2.4 La generación de tecnologia	7
2.4.1 Métodos de riego convencionales	8

2.4.2	Métodos de riego no convencionales.....	8
2.5	El riego por cápsulas porosas	9
2.5.1	Reseña histórica	9
2.5.2	Ventajas del sistema por cápsulas porosas.....	10
2.5.3	Adaptabilidad del sistema.....	10
2.5.3.1	Factores externos	11
2.5.3.1.1	El Clima.....	11
2.5.3.1.2	La textura del suelo	11
2.5.3.1.3	Topografía.....	12
2.5.3.2	Factores internos.....	12
2.5.3.2.1	La porosidad y permeabilidad de las cápsulas	12
2.5.3.2.2	Presión hidrostática de funcionamiento.....	13
2.5.4	El bulbo de humedecimiento.....	13
2.6	Tipos de movimiento de agua en el suelo	14
2.6.1	Fundamentos de la capilaridad.....	14
2.6.2	Flujo no saturado	15
2.6.3	Flujo saturado.....	16
2.7	Potenciales hídricos	17
2.7.1	Potencial de agua del suelo	17
2.7.2	Potencial matriz.....	18
2.7.3	Potencial gravitatorio.....	19
2.7.4	Potencial de presión.....	19
2.7.5	Potencial osmótico.....	20
2.7.6	Clasificación del agua del suelo	21

2.7.6.1	Capacidad de campo.....	21
2.7.6.2	Punto de marchitez permanente.....	21
2.7.6.3	Agua fácilmente aprovechable.....	22
2.7.7	Ley de Darcy.....	22
2.7.7.1	Permeabilidad y conductividad hidráulica.....	24
2.7.7.2	Ecuaciones de flujo y relaciones recíprocas básicas.....	24
2.7.7.3	Relación entre el flujo, el tamaño y la forma del poro.....	25
2.7.7.4	Heterogeneidad de materiales porosos.....	25
2.7.7.5	Conductividad hidráulica en suelos no saturados.....	25
2.7.7.6	Conductividad capilar y difusividad.....	26
2.8	Las arcillas del suelo.....	28
2.8.1	Grupo de la Caolinita.....	28
2.8.2	Grupo de la Montmorillonita.....	29
2.8.3	Grupo de la Illita.....	29
2.9	Tecnología cerámica.....	29
2.9.1	Colada.....	30
2.9.1.1	Comportamiento de una colada.....	31
2.9.1.2	Defectos de la colada.....	34
2.9.2	Escayola.....	35
2.9.2.1	La escayola en la elaboración de moldes.....	35
2.9.2.2	Funciones del molde de escayola dentro de la cerámica.....	36
2.9.3	La desfloculación.....	37
2.9.4	Cochura o quema.....	38
2.9.5	Formación de porosidad.....	39

2.9.5.1	Material no vitrificado	40
2.9.5.2	Inclusión de material volátil o combustible.....	40
2.9.5.3	Incorporación de chamota.....	40
2.10	Investigaciones realizadas sobre el tema.....	40
3.	MATERIALES Y METODOS	45
3.1	Generalidades.....	45
3.1.1	Fase de diseño	45
3.1.2	Fase de construcción.....	45
3.1.3	Fase de laboratorio	46
3.1.4	Fase de evaluación.....	46
3.2	Metodología de Diseño	46
3.2.1	La forma de la cápsula	48
3.2.1.1	Cono truncado.....	48
3.2.1.2	Cilindro	48
3.2.1.3	Esfera	49
3.2.1.4	Ovoide.....	49
3.3	Metodología de Construcción	49
3.3.1	Materiales de Construcción.....	49
3.3.1.1	Materias primas	50
3.3.1.1.1	Arcilla de Ilobasco.....	50
3.3.1.1.2	Ceniza volcánica	50
3.3.1.1.3	Arcilla de loza.....	51
3.3.1.2	Aditivos	51
3.3.1.2.1	Arena.....	51

3.3.1.2.2	Carbón de madera	51
3.3.1.2.3	Harina de trigo	52
3.3.1.2.4	Estiércol de bovino.....	52
3.3.1.2.5	Carbonato de calcio.....	52
3.3.1.2.6	Aserrín.....	52
3.3.1.3	Otros materiales.....	53
3.3.1.3.1	Escayola.....	53
3.3.1.3.2	Silicato de Sodio	53
3.3.2	Métodos de construcción.....	53
3.3.2.1	Torno de alfarero	54
3.3.2.2	Repujado en molde de yeso	54
3.3.2.3	Colada con barbotina en molde de yeso	55
3.3.3	Construcción de las cápsulas.....	55
3.3.3.1	Modelado del machote	56
3.3.3.2	Obtención del molde y contra molde.....	56
3.3.3.3	Preparación de la barbotina.....	57
3.3.3.4	Moldeado de las cápsulas.....	57
3.3.3.5	Secado de las cápsulas	58
3.3.3.6	Vidriado	58
3.3.3.7	Cocción de las cápsulas.....	59
3.3.3.8	Formación de porosidad	59
3.4	Metodología de Evaluación.....	60
3.4.1	Geometría de la cápsula.....	60
3.4.1.1	Cálculo del volumen del ovoide.....	60

3.4.1.2	Cálculo de la superficie del ovoide	61
3.4.2	Determinación de liberaciones de agua	63
3.4.2.1	Determinación del caudal específico	63
3.4.2.2	Determinación de la conductividad hidráulica	64
3.4.3	Determinación de las constantes físicas de las cápsulas	65
3.4.3.1	Determinación de la densidad	65
3.4.3.1.1	Densidad verdadera	66
3.4.3.1.2	Densidad a granel	66
3.4.3.1.3	Densidad aparente de sólidos	67
3.4.3.2	Determinación de la porosidad	68
3.4.3.2.1	Porosidad aparente	68
3.4.3.2.2	Porosidad verdadera	68
3.4.3.2.3	Porosidad cerrada	69
3.4.4	Determinación del modelo matemático para las curvas caudal-carga 69	69
3.4.5	Evaluación del bulbo de humedecimiento	70
3.4.5.1	Construcción de cajas	70
3.4.5.2	Conexión del sistema	70
3.4.5.3	Preparación del suelo	71
3.4.5.4	Llenado de cajas	71
3.4.5.5	Determinación del comportamiento del bulbo	72
3.4.5.5.1	Contenido de humedad inicial	72
3.4.5.5.2	Gravedad específica aparente	73
3.4.5.5.3	Gravedad específica real	74
3.4.5.5.4	Porosidad del suelo	75

3.4.5.5.5 Gasto de agua y medidas del diámetro en el bulbo de húmedecimiento	75
3.4.5.5.6 Contenido de humedad a diferentes tensiones	76
3.4.5.5.7 Curvas de retención de humedad	76
3.4.5.5.8 Contenido de humedad del bulbo.....	76
3.4.6 Determinación del modelo matemático para la difusión del bulbo de húmedecimiento	76
3.4.7 Determinación del modelo matemático para la distribución de la humedad del bulbo	77
3.5 Determinación de costos de producción.....	78
3.5.1 Requerimientos de materia prima.....	78
3.5.2 Requerimientos de otros materiales.....	79
3.5.2.1 Yeso	79
3.5.2.2 Silicato de sodio.....	79
3.5.3 Costos de proceso	79
4. RESULTADOS	80
4.1 Diseño de la cápsula	80
4.1.1 Ensayos de la forma de la cápsula	80
4.1.1.1 Cono truncado.....	80
4.1.1.2 Cilindro	81
4.1.1.3 Esfera	82
4.1.1.4 Ovoide.....	82
4.1.2 Dimensiones de la cápsula	83
4.2 Construcción de las cápsulas.....	84

4.2.1. Métodos de construcción.....	84
4.2.1.1 Torno de alfarero	84
4.2.1.2 Repujado en molde de yeso	85
4.2.1.3 Colado con barbotina en molde de yeso	85
4.2.2 Comportamiento de los materiales de construcción.....	86
4.2.2.1 Arcilla de Ilobasco	86
4.2.2.2 Arcilla de loza.....	87
4.2.3 Comportamiento de los aditivos	87
4.2.3.1 Arena.....	87
4.2.3.2 Carbón de madera.....	88
4.2.3.3 Harina de trigo.....	88
4.2.3.4 Estiércol de bovino.....	89
4.2.3.5 Carbonato de calcio.....	89
4.3 Evaluación hidráulica	90
4.3.1 Análisis de las dimensiones y volúmen de las cápsulas.....	90
4.3.1.1 Aire en el interior de las cápsulas	94
4.3.2 Evaluación de liberaciones de agua en medio acuoso.....	97
4.3.2.1 Curvas caudal-carga	97
4.3.2.2 Propiedades físicas de las cápsulas	98
4.3.2.3 Selección de la mezcla y carga hidráulica	98
4.3.3 Evaluación del bulbo de humedecimiento en diferentes texturas de suelo	99
4.3.3.1 Propiedades físicas de los suelos	99
4.3.3.1.1 Textura de los suelos de prueba.....	99

4.3.3.1.2	Retención de humedad	100
4.3.3.1.3	Curvas de retención de humedad	101
4.3.3.1.4	Otras propiedades físicas de los suelos	101
4.3.3.1.5	Modelo de predicción para las curvas retención de humedad.....	102
4.3.3.2	Diámetro del bulbo de humedecimiento.....	103
4.3.3.2.1	Medidas del diámetro del bulbo húmedo	104
4.3.3.3	Gasto de agua	109
4.3.3.4	Contenido de humedad del bulbo	109
4.3.3.5	Modelos de predicción para el contenido de humedad en el bulbo.....	112
4.4	Costos de producción.....	114
4.4.1	Costos de arcilla de loza	114
4.4.2	Costo de silicato de sodio.....	114
4.4.3	Costo de la mano de obra.....	115
4.4.4	Gasto de yeso.....	115
4.4.5	Costo de acabado y aplicación de gley.....	115
4.4.6	Costo de quema de las cápsulas	116
4.4.7	Costo de arrendamiento del local	116
4.4.8	Costo de transporte	116
4.4.9	Costos de servicios	117
4.4.10	Otros costos	117
4.4.11	Costo total de la cápsula.....	118
5.	DISCUSION DE RESULTADOS	119

5.1	Diseño y construcción de la cápsula	119
5.1.1	Formas y métodos de construcción	119
5.1.2	Aditivos para la porosidad	120
5.2	Evaluación hidráulica	121
5.2.1	Liberaciones de agua en medio acuoso	121
5.2.2	El bulbo de humedecimiento y su comportamiento en diferentes texturas de suelos	124
5.2.2.1	El contenido de humedad del bulbo	124
5.2.2.2	Dimensiones del tamaño del bulbo	126
5.3	Evaluación económica	128
6.	CONCLUSIONES	130
7.	RECOMENDACIONES	134
8.	BIBLIOGRAFIA.....	136
	ANEXOS	118

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Pág.
1	Dimensiones de las cápsulas elaboradas con las diferentes formas geométricas y su volumen.	80
2	Datos sobre las dimensiones de las cápsulas porosas y corrección de volumen teórico.	83
3	Liberaciones de agua obtenidas para las diferentes proporciones de mezclas en medio acuoso y bajo diferentes cargas hidráulicas	93
4	Propiedades hidráulicas de las cápsulas porosas de acuerdo a las proporciones de mezclas utilizadas.	94
5	Modelos de predicción para liberaciones de agua por las cápsulas porosas de arcilla construidas con diferentes mezclas de materiales y sometidas a diferentes cargas hidráulicas.	95
6	Resumen de las propiedades físicas de las cápsulas porosas ovoides de arcilla.	97
7	Resultado del análisis de suelos por el método del hidrómetro de Bouyoucos.	98
8	Contenido de humedad gravimétrica a diferentes tensiones para las tres texturas de suelos en estudio.	100
9	Propiedades físicas de los suelos utilizados para la evaluación del bulbo de humedecimiento.	100
10	Coefficientes de regresión para las curvas de retención de humedad de las diferentes texturas de suelos	102

11	Medidas del diámetro del bulbo húmedo con respecto al tiempo en las texturas de suelos	105
12	Modelos de predicción para las medidas del diámetro del bulbo húmedo en tres texturas de suelos.	105
13	Distribución del contenido de humedad obtenido en las diferentes texturas de suelo.	109
14	.Datos de gasto de agua de columnen por capsula obtenidos a nivel de ensayo en diferentes textura de suelo.	110
15	Modelos matemáticos obtenidos para el contenido el humedad en los bulbos.	112

INDICE DE FIGURAS

1	Diferentes formas geométricas ensalladas	84
2	Curvas de liberaciones de agua de las capsulas porosas ovoides para las diferentes cargas hidrostáticas y mezclas barbotina-aserrin.....	96
3	Curvas de predicción de liberaciones de agua de las cápsulas porosas ovoides con diferentes cargas hidrostáticas y mezclas.....	96
4	Curvas de retención de humedad de los suelos en estudio a diferentes tenciones	101
5	Curvas de predicción de retención de humedad de los suelos en estudio a diferentes tenciones.....	103
6	Curvas del tamaño del diametro del bulbo de humedecimiento con respecto al tiempo.Repetición I.....	106
7	Curvas del tamaño del diametro del bulbo de humedecimiento con respecto al tiempo. Repetición II.....	107
8	Curvas de predicción del tamaño del diametro del bulbo de humedecimiento, de los diferentes suelos en estudio,en función del tiempo.....	108
9	Curvas del gasto de agua en las diferentes texturas de suelo , en función del tiempo.....	111
10	Curvas de contenido de humedad en los bulbos de humedecimiento de los suelos en estudio.....	112
11	Curvas de predicción de la distribución de la humedad en los bulbos de humedecimiento de	114

1. INTRODUCCION

El Salvador, al igual que muchos países del mundo posee un elevado índice poblacional, lo que exige una agricultura con aumento en la producción para cubrir la creciente demanda alimenticia. Esta situación, provoca una gran presión sobre todo los recursos naturales existentes, lo que hace necesario la búsqueda de mecanismos que permitan hacer un mejor aprovechamiento de los recursos físicos-hídricos limitados, de forma racionada, con economía y eficiencia. Gran parte de las tierras cultivables del país, son utilizadas únicamente en la estación lluviosa, permaneciendo ociosas durante la época seca, limitándose en esta la producción de alimentos, lo que conlleva a la búsqueda de alternativas de producción en época seca aplicándose la técnica del riego. Existen sistemas de riego convencionales y no convencionales, encontrándose en este último el método de riego por cápsulas porosas de arcilla el cual es desconocido a nivel nacional y muy poco a nivel internacional, tanto por profesionales en la rama del riego como por los agricultores, esto nos conlleva a realizar un estudio de investigación mas minucioso a nivel científico-técnico. En el presente trabajo se describe el diseño, construcción y evaluación hidráulica de cápsulas porosas de arcilla con fines de riego; estableciéndose los materiales, aditivos y la metodología para su construcción; generándose información de la propiedades hidráulicas de las cápsulas porosas como lo son: caudal específico, coeficiente de permeabilidad y curvas caudal-carga.

En el presente trabajo se describe el diseño, construcción y evaluación hidráulica de cápsulas porosas de arcilla con fines de riego; estableciéndose los materiales, aditivos y metodología de construcción, generándose información de las propiedades hidráulicas de las cápsulas porosas como lo son caudal específico coeficiente de permeabilidad y curvas caudal-carga.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1 Generalidades sobre el riego

2.1.1 El papel del agua en las plantas

El papel que juega el agua en la nutrición y desarrollo de todos los seres vivos y de las plantas en particular, es fundamental, ya que es un elemento constitutivo de ellas, ya sea como agua de constitución o combinada con los elementos que se encuentran en el suelo y aire, también sirve de vehículo para los elementos minerales en la nutrición de las plantas, la cual es llamada agua de vegetación (6).

Los cultivos necesitan agua en cantidades adecuadas para poder sobrevivir y producir, las plantas están constituidas del 90% de agua. En condiciones normales 1 m² de vegetación transpira unos 5.5 lts de agua al día, o sea, el cultivo de una hectárea pierde aproximadamente 55 m³ de agua (10).

El hombre, desde la antigüedad ha venido domesticando ciertos tipos de plantas, y a visto la importancia de suministrar agua en forma complementaria (riego), sin la cual éstas no podrían desarrollarse o alcanzar su máximo potencial productivo (6).

2.1.2. Relación suelo-planta-agua

La relación entre suelo-planta-agua trata de las propiedades físicas de los suelos y plantas que afectan el movimiento, retención y uso del agua, las cuales deben ser tomadas en cuenta en la

planeación del riego (9). De esta forma la adecuada relación de los factores suelo-planta-agua, establecen el óptimo rendimiento de las producciones, pues aquel factor que se encuentre en menor proporción será el que determinará en última instancia la producción (5).

2.1.3 Concepto de riego

El riego se define como el acto de aplicar agua a las plantas en el momento oportuno y en la cantidad apropiada. Uno de los objetivos del riego es completar todo el déficit de agua que se produjo en la zona radicular sin producir excesos y falta de aire, así como producir y mejorar las producciones. El suelo como depósito de agua y alimento influye en forma directa en el desarrollo de las plantas (9).

2.2 Desarrollo del riego

2.2.1 El riego en la historia

Durante toda la historia el riego ha sido un factor potente de generación de riquezas, sus orígenes están muy lejanos ya que muchos imperios lo usaban a gran escala, puesto que conocían sus bondades, así, se tiene evidencia que en la India, Asia, Egipto y en Suramérica se usó el riego como medio para incrementar la producción y las riquezas de las antiguas civilizaciones (6).

2.2.2 El riego en El Salvador

En El Salvador el desarrollo agrícola presenta características singulares, puesto que se explotan tierras con vocación agrícola únicamente durante la estación lluviosa, que en la época seca permanecen sin cultivar, en tal sentido el riego constituye una de las mejores alternativas para incrementar la producción agrícola (2).

El uso de los recursos hídricos en forma racional para el incremento de la producción, es algo relativamente nuevo en nuestro país, puesto que hacia los años 60 se aplicaba un tipo de riego no tecnificado a nivel de pequeñas parcelas pero sin mayores conocimientos de manejo para lograr buenas eficiencias en la aplicación.

A partir de 1966 se fueron creando instituciones encargadas del riego en nuestro país, las cuales han venido desarrollando proyectos de riego de gran envergadura.

La Dirección General de Riego y Drenaje, reporta que el país cuenta con un área potencial de riego de 260,000 has, de las cuales se están regando actualmente solo el 13% (2).

2.3 Métodos de riego

Los métodos de riego, se pueden clasificar según la forma de aplicar el agua al suelo (2), así se tiene que en la actualidad, la práctica moderna define cuatro métodos (5):

- Superficiales
- Por aspersión
- Microrriego
- Subterráneo

2.3.1 Riego superficial o por gravedad

Este método consiste en derivar una parte de la corriente de un río u otras fuentes de agua, conduciéndolas por medio de canales hasta los campos de cultivo, aplicándola ya sea por surcos, corrugaciones, melgas y por inundación (2,5). El agua se aplica sobre el suelo el cual es humedecido por inundación, tratándose de mojar el 100% del suelo cultivado. En general, en este método de riego, menos de la mitad del agua derivada de la fuente llega a los cultivos, obteniéndose eficiencias de riego muy bajas, que en el país pueden llegar al 20 o 30%, con el agravante de grandes pérdidas de suelo a causa de la erosión provocada por el mal uso de los sistemas.(2,6).

En los últimos años han habido importantes innovaciones dentro de el riego superficial, lográndose mejoras en la uniformidad de la distribución del agua y una mayor eficiencia en su uso, no obstante, para el logro de estas ventajas debe emplearse tecnología de punta (rayos láser, equipo computarizado y automatizado) (2).

2.3.2 Riego por aspersión o aéreo

En este tipo de riego se trata de imitar a la lluvia, distribuyendo el agua a través de una red de tuberías utilizando generalmente la potencia de una bomba, luego el agua es dispersada en el aire por medio de aspersores, para que ésta sea pulverizada en pequeñas gotas y caiga sobre el suelo y los cultivos. (9). La adopción de este sistema de riego, dependerá de los costos de operación, incluyendo los de bombeo y de la rentabilidad del cultivo a establecer (2).

2.3.3 Microirrigación

Aquí se incluyen varios métodos de riego, los cuales tienen la característica de dejar salir el agua gota a gota a través de uno o más emisores o boquillas instalados en una manguera o tubo de plástico, que se coloca sobre el suelo o enterrado a poca profundidad (2). El riego por goteo es el más conocido y al igual que el riego por aspersión, constituyen sistemas presurizados, solo que aquí el agua se conduce a la parcela por una red de tuberías las cuales van pegadas a la hilera de plantas o árboles y con emisores a intervalos regulares; en las tuberías se hacen agujeros para insertar los emisores de agua (2,6).

La cantidad de agua que debe ser liberada oscila entre 1 a 10 lt/hr por boquilla, dependiendo de la tasa de consumo de agua de las plantas a regar. El microriego conserva agua al regar una porción más limitada de suelo, reduciendo la evaporación directa (2). Además del riego por goteo, en los métodos de microirrigación se encuentran el de microaspersores y el microjet.

2.3.4 Riego subterráneo o subsuperficial

También llamado sub-irrigación, en el cual el agua es aplicada por debajo de la superficie del terreno a través de distintos mecanismos, como canales subterráneos o tuberías perforadas de doble propósito (riego y drenaje). El método consiste en la creación de una capa freática artificial en el suelo (2).

2.4 La generación de tecnologías

A partir de fracasos de numerosos proyectos basados en la introducción de la tecnología moderna (tecnologías de los países templados del hemisferio norte), se ha reconsiderado la cuestión de la tecnología; de esta manera han surgido nuevas corrientes de pensamiento como tecnologías apropiada, adecuada, intermedia, y otras que buscan ser alternativas a las fórmulas pesadas de la tecnología agrícola moderna.

En la base de los planteamientos de éstas nuevas tendencias, se encuentran dos cuestionamientos importantes:

- a. El mito de una tecnología moderna que sería universalmente válida.
- b. La dependencia tecnológica como uno de los factores negativos para el desarrollo.

El primer factor hace referencia a los intentos de ofrecer una misma tecnología en todas partes del planeta, que a su vez va aparejado con el reglamento de modelos y objetivos de desarrollo supuestamente universales (17).

Bajo este contexto, las tecnologías modernas adquieren el carácter de convencionales cuando se establecen en virtud de precedentes o de costumbres , en otras palabras, este conjunto de técnicas y estructuras que conforman la tecnología no son el reflejo de las necesidades sentidas de una población, sino producto de un acuerdo convencional entre los hombres de ciencia, el cual en última instancia está determinado por consideraciones de comodidad y sencillez (20, 3).

De acuerdo ha éste planteamiento se pueden clasificar los sistemas de riego en convencionales y no convencionales.

2.4.1 Métodos de riego convencionales

Según Clarke Robin, citado por Baquedano (3), la tecnología moderna, dentro de la cual están incluidos los sistemas convencionales de riego, forman parte del Sistema Tecnológico Dominante, el cual se caracteriza por las siguientes propiedades:

- Tecnologías extremadamente complejas que exigen el recurso de especialistas para los procesos de producción, utilización y mantenimiento.
- Demandan un gran aporte de capital e inversiones.
- Han sido concebidas para una gran escala de producción, lo que supone la producción en serie.
- Hacen imposible el trabajo creativo.
- Contribuyen a la contaminación del medio ambiente.

2.4.2 Métodos de riego no convencionales

El riego no convencional se define como la aplicación de agua al suelo usando dispositivos de fabricación artesanal, los que generalmente se usan en pequeñas áreas, pero que constituyen una alternativa tecnológica para el pequeño agricultor. (6).

En 1983 la Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe (ROSTLAC), realizó investigaciones sobre métodos de riego no convencionales, a través del Proyecto Regional Mayor (PRM), el cual entre otros objetivos buscaba integrar las tecnologías relacionadas con el agua, todo esto en función de:

- a. Las necesidades de la población
- b. Los recursos naturales renovables existentes

c. La capacidad técnica disponible localmente

De esta forma la ROSTLAC clasificó como métodos de riego no convencionales a los potes de arcilla, las cápsulas porosas y la sub-irrigación flotante. (27).

2.5 El riego por cápsulas porosas

2.5.1 Reseña histórica

El pote de arcilla es probablemente una de las primeras expresiones de la capacidad tecnológica del hombre. Surgió como recipiente portátil, hecho de barro y endurecido mediante un proceso de cocimiento, para almacenar y transportar cualquier tipo de líquido o granulado sólido necesario para satisfacer una necesidad del hombre.

De ahí que las vasijas hayan acompañado al ser humano desde la cuna hasta la sepultura, pudiendo asegurarse que el pote de arcilla es tan antiguo como la misma cultura. Aunque se puede considerar la fabricación de potes como una de las tecnologías básicas, que no requieren transferencia, ya que toda sociedad humana los ha inventado, pudiendo aplicarse el mismo de otras maneras, como lo son las cápsulas porosas para el riego (26).

La modalidad del riego por medio de vasijas porosas o potes de arcilla es bastante antigua y su origen data de hace varios siglos; se cree que tubo su origen en las regiones semiáridas del Punjab y el Rajasthan, en Oriente medio y en el norte de Africa donde todavía se puede encontrar como tecnología tradicional (26).

2.5.2 Ventajas del sistema de riego por cápsulas porosa

De acuerdo con las investigaciones realizadas en 1981 por Vargas (25), el sistema propuesto se vislumbra como una alternativa con una enorme cantidad de ventajas con respecto a los sistemas de riego convencionales. Algunas de las ventajas más significativas son las siguientes:

- a. Se logra una disponibilidad de agua oportuna y volúmenes adecuados próximos a la capacidad de campo.
- b. Se minimizan las pérdidas directas por evaporación del suelo.
- c. Existe mayor control del manejo, distribución y gasto del agua.
- d. Disminuye la competencia por malezas y la aplicación de fertilizantes se optimiza.
- e. Se logra mayor densidad de explotación, porque admite mayor número de plantas por cada línea, al existir dotación adecuada de agua.
- f. Con pequeños volúmenes de agua y bajos requerimientos energéticos para bombeo se logran altos rendimientos, no sólo al controlar el agua, sino también un sin número de plagas que prosperan en otros sistemas de riego.
- g. Se eliminan las pérdidas que por conducción y manejo sufren los sistemas convencionales.
- h. La construcción de las cápsulas puede efectuarse en forma industrial y artesanal, ello permite un amplio desarrollo del sistema en todos los rangos de la actividad agrícola.

2.5.3 Adaptabilidad del sistema

El sistema debe de adaptarse al medio tomando en cuenta dos grupos de factores; estos se han clasificado de acuerdo a la posibilidad de ser modificados y son los siguientes:

a. Los factores externos

b. Los factores internos

2.5.3.1 Factores externos

Son aquellos que no se pueden modificar. Dentro de los factores externos que más inciden en la adaptabilidad del sistema a las condiciones locales se tienen:

a. El clima específico del lugar

b. La textura del suelo

c. La topografía

2.5.3.1.1 El clima

Este factor determinará la tasa de evapotranspiración del cultivo o sea la demanda evaporativa de la atmósfera. La pérdida diaria de agua por transpiración excede frecuentemente al contenido hídrico de una planta. Si la mayor parte de la pérdida de agua no fuera inmediatamente reemplazada, las plantas que transpiran rápidamente morirían por desecamiento en un solo día (14).

2.5.3.1.2 La textura del suelo

Esta se encuentra directamente asociada con los fenómenos relacionados al movimiento del agua en los suelos. En los suelos arenosos el ajustamiento de la diferencia de potenciales es más rápida,

por lo que el agua se mueve con mayor rapidez, en cambio en un suelo arcilloso a pesar de que el movimiento del agua es mas lento, esta puede recorrer una mayor distancia, debido al tamaño capilar y continuidad de los poros (7).

2.5.3.1.3 Topografía

En cuanto a la topografía, esta no resulta ser limitante dado que si las cápsulas se instalan según las curvas a nivel de un terreno inclinado, el agua fluirá siempre con normalidad (23). Para algunos sistemas de riego la geometría del terreno es muy importante, pero con el método de las cápsulas no importa si ésta fuera desuniforme, pues las eras pueden acomodarse a cualquier situación, aprovechando de esta manera el máximo de espacio cultivable (25).

2.5.3.2 Factores internos

Son los factores que pueden ser modificados, de acuerdo a éstos, la adaptación del sistema debe de realizarse regulando las siguientes propiedades:

- a. La porosidad y permeabilidad de las cápsulas
- b. La presión hidrostática con la cual opera el sistema

2.5.3.2.1 La porosidad y permeabilidad de las cápsulas

Este primer factor permite que el agua en las cápsulas sea liberada por la succión debida a las fuerzas capilares (presión negativa) que se establecen entre ésta y el terreno circundante. (26). Este

es el mecanismo que permite el funcionamiento del método de riego por succión, el cual no requiere de una fuente externa de energía, sino que el movimiento del agua obedece a la diferencia de potencial que en ella se establece (13).

La porosidad de las cápsulas está íntimamente relacionada con la permeabilidad, dado que cuando se varía la porosidad de las cápsulas también se varían la liberación de agua, así como la resistencia mecánica de éstas (23).

En cuanto a la porosidad de las cápsulas, ésta puede regularse a través de distintos métodos los cuales serán descritos posteriormente.

2.5.3.2.2 Presión hidrostática de funcionamiento

El segundo factor permite que además del flujo por capilaridad, que se establezca un flujo espontáneo por presión hidrostática (presión positiva), a fin de balancear las pérdidas por evapotranspiración intensiva instantánea (26).

El agua liberada por las cápsulas puede regularse variando la presión hidrostática o diferencia de altura entre el nivel de agua mantenido en el depósito o tanque de distribución y el centro de gravedad del volumen de agua contenido en las cápsulas (25).

2.5.4 El bulbo de humedecimiento

En este método al igual que en el de goteo, el agua es descargada lentamente por las cápsulas hacia su alrededor, formándose de esta manera una zona de suelo húmedo, la cual se denomina bulbo de mojado por su forma característica (Fig. 1).

2.6 Tipos de movimiento de agua en el suelo

El agua es un constituyente del suelo notablemente dinámico, esto se debe principalmente a su movilidad. Tres tipos de movimiento del agua en el suelo han sido reconocidos: Flujo saturado, flujo no saturado y ajustes con el vapor (7). Para las aplicaciones del presente estudio se hará referencia a los primeros dos.

2.6.1 Fundamentos de la capilaridad

En un caso ideal de capilaridad, si la parte inferior de un tubo de vidrio de dimensiones capilares fuera colocada verticalmente en el agua, el líquido subirá más arriba del nivel exterior de la superficie del agua. El fenómeno llamado capilaridad, se inicia por la atracción de las moléculas de vidrio por el agua (adherencia), lo cual provoca que el líquido suba alrededor de las paredes del tubo. Al mismo tiempo, debido a la atracción de las moléculas de agua entre sí (cohesión), aquella porción del líquido no afectada directamente por la adherencia es empujada progresivamente hacia arriba, conservándose así la columna intacta. En otras palabras, las fuerzas de tensión superficial en la interfase líquido-aire son lo suficientemente potentes para soportar aquella porción de la columna no atraída directamente por las paredes del tubo. De aquí que una columna continua de agua vaya subiendo hasta que su peso iguale exactamente la atracción adherente, empujando el líquido hacia arriba teniendo como resultado un equilibrio capilar.

En general se sabe que cuanto más delgado es el tubo, mayor será la altura de la columna de agua, esto debido que en una sección del tubo capilar, la superficie de adherencia por unidad de peso del agua es mayor en tubo delgado que en uno más ancho.

El movimiento capilar ascendente que se da en los suelos, es similar al que se da en un tubo, solo que aquí, el ajustamiento del nivel final es muy irregular debido a la naturaleza tortuosa de los canales, su variabilidad en el tamaño y a la presencia de aire interpuesto (7).

2.6.2 Flujo no saturado

El flujo no saturado se produce por diferencias de tensión en el agua del suelo, así, el agua se desplazará de regiones de baja tensión (alta humedad) a las zonas vacías de humedad (con películas de agua delgadas y tensiones altas).

Este movimiento de la humedad, descendente o ascendente, según la tensión de las películas, representa el ajuste que regularmente existe en los suelos. Existen casos donde el agua se mueve hacia arriba, desde una lámina acuosa a través de los microporos del suelo por el fenómeno de la capilaridad (ascensión capilar), y también es llamado flujo no saturado, pero en general dentro del flujo no saturado, la dirección del movimiento dependerá de la tensión de las películas acuosas situadas alrededor, y entre las partículas del suelo. Y lo que es especialmente importante, la remoción del agua desde cualesquiera poros determinados, inicia un movimiento en esta dirección por disminución del espesor de la película y de aquí que se aumente el empuje en este punto.

Este tipo de movimiento, actúa continuamente en los suelos, incluso, debido a la naturaleza dinámica de éstos, se alcanza en cada caso un equilibrio capilar. De todas las formas de movimiento del agua en el suelo, este tipo de ajuste de la película es, acaso, de la mayor significación respecto a las condiciones del suelo y al crecimiento de las plantas (7).

2.6.3 Flujo saturado

A medida que el agua, tanto de lluvia como de riego, va añadiéndose a un suelo, penetra por la superficie, reemplazando al aire, primero en los macroporos y luego en los microporos. El agua adicional se moverá hacia abajo por un proceso llamado flujo saturado, que será reforzado tanto por la fuerza de la gravedad como de la capilaridad. Tal movimiento continuará hasta tanto se haya conseguido una humedad adecuada y no hallará barreras frente a este movimiento de descenso.

La cantidad de agua que se mueve a través del perfil será determinada por un cierto número de factores que incluyen los siguientes:

- a. Cantidad de agua aplicada.
- b. Capacidad de infiltración del suelo.
- c. Conductividad de humedad de los horizontes inferiores.
- d. Retención de agua del perfil a capacidad de campo.

Desde un punto de vista práctico, será la textura y la estructura de los diversos horizontes de un suelo quién determine en un alto grado la influencia de estos factores (7).

2.7 Potenciales hídricos

2.7.1 Potencial del agua del suelo

El potencial del agua del suelo es la intensidad con que el agua se encuentra retenida en el suelo, aunque formalmente puede ser definido como la cantidad de trabajo que una cantidad unitaria de agua en un sistema suelo-agua o agua-planta, en equilibrio, es capaz de realizar cuando se mueve hasta el agua en el estado de referencia a la misma temperatura. Comúnmente se elige como estado de referencia el agua pura. Se debe de hacer notar que el movimiento del agua al estado de referencia tiene que ocurrir a través de una membrana semipermeable (12).

El potencial del agua del suelo se puede definir de la siguiente manera:

$$\psi_w = \psi_m + \psi_g + \psi_p + \psi_o \quad (2.1)$$

donde:

ψ_w : potencial total del agua en el suelo

ψ_m : potencial de matriz

ψ_g : potencial de gravedad

ψ_p : potencial de presión

ψ_o : potencial osmótico.

2.7.2 Potencial matriz

El potencial matricial del suelo es la cantidad de trabajo que debe efectuarse por cantidad unitaria de agua para transportar de modo reversible e isotérmico una cantidad infinitesimal de agua desde un depósito que contiene una solución de composición idéntica a la del agua del suelo, con la altura y la presión gaseosa externa del punto considerado, hasta el agua del suelo.

El potencial matricial está relacionado con la atracción del agua por superficies sólidas y con la atracción mutua de las moléculas de agua, o sea que está relacionado con las fuerzas de absorción de la matriz del suelo. Si la cantidad de agua se expresa como peso, entonces el potencial matricial en ese punto es la distancia vertical entre ese punto en el suelo, y la superficie del agua de un manómetro lleno de agua y conectado al suelo en cuestión, vía una cerámica porosa.

En los poros llenos de agua de la cerámica se crea una presión negativa o tensión positiva por medio de la columna líquida pendiente del manómetro. La presión de agua en el manómetro se equilibra con el suelo adyacente por el movimiento del agua a través de la membrana cerámica.

De esta definición se infiere que los potenciales matriciales son negativos, puesto que el agua desde el depósito de referencia fluirá fácilmente al suelo seco con liberación de energía en forma de calor. Esto significa que se produce trabajo en la mojadura en vez de necesitarse este.

El potencial matricial del agua por encima del nivel del agua subterránea es negativo, y por debajo de un nivel de agua libre se vuelve igual a cero.

Este potencial ha sido citado como el antiguo potencial de los capilares por cuanto es análogo en buena porción de su intervalo de valores a la situación que existe cuando el agua asciende en tubos capilares. Sin embargo, los fenómenos que envuelve la expresión "potencial matricial", se extienden más allá de los asociados con la interfase aire-agua de los pequeños poros. Al disminuir

la cantidad de agua en un material poroso, el agua contenida en los poros con interfase aire-agua claramente negativa (como en el ascenso capilar) es despreciable en comparación con la retenida por la superficie de las partículas. Por lo consiguiente, la expresión potencial matricial cubre otros fenómenos además de aquellos en los que es apropiada la analogía con el potencial de los capilares (12).

2.7.3 Potencial gravitatorio

El potencial gravitatorio o potencial de gravedad es la cantidad de trabajo que debe efectuarse por cantidad unitaria de agua pura para transportar de modo reversible e isotérmico una cantidad infinitesimal de agua desde un depósito que contiene una solución de composición idéntica a la del agua del suelo a una altura especificada del punto considerado. Este potencial es en otras palabras, la diferencia en elevación del punto en consideración al punto de referencia. La altura elegida como referencia determina el carácter negativo o positivo de los potenciales de gravedad, así si el punto en consideración esta arriba del de referencia, hay que producir trabajo en el agua y el potencial es positivo; si el punto en consideración está por debajo del de referencia, el trabajo es generado por el agua y el potencial es negativo (13).

2.7.4 Potencial de presión

Es un potencial que se debe al peso del agua en un punto considerado o a presión del gas distinta de la que existe en la posición de referencia. Se puede decir también que este potencial se expresa como la distancia entre un punto encuestión y el nivel del agua en el piezómetro.

Si el punto está por debajo del agua freática, el potencial es igual y de signo opuesto al potencial de gravedad que se mide desde la superficie libre del agua (13).

2.7.5 Potencial osmótico

El potencial osmótico resulta de la hidratación de iones en la solución del suelo. El carácter polar del agua, con dos sitios electropositivos y dos electronegativos, hace que las moléculas de agua sean atraídas por los iones de la solución del suelo. Un polo negativo de la molécula es atraído por los iones positivos, y los polos positivos del agua (protones de hidrógeno) son atraídos por iones negativos. Estas fuerzas de atracción orientan el agua en torno de los iones, y el potencia osmótico es el trabajo requerido para separar el agua de estos iones.

Las fuerzas osmóticas son importantes en el estudio de los suelos y de las plantas. La mayoría de las sustancias disueltas en el agua del suelo y en los tejidos de las plantas no son volátiles a las temperaturas ordinarias y quedan como residuo al evaporarse el agua. Para eliminar el agua de una solución que contiene solutos, es preciso suministrar mayor cantidad de energía que para eliminar el agua pura.

Las partículas de arcilla suspendidas en una solución causan el mismo fenómeno en virtud de la atracción que la arcilla ejerce sobre el agua. Podría discutirse si el fenómeno es un efecto osmótico por comportarse la partícula como un ión o si es un efecto matricial porque obedece a fuerzas atractivas de una partícula sólida. Aquí se considera como efecto matricial (13).

2.7.6 Clasificación del agua del suelo

2.7.6.1 Capacidad de campo

La capacidad de campo de un suelo es el contenido hídrico después de que se haya vuelto muy lento el escurrimiento del agua gravitacional, y relativamente estable el contenido hídrico. La situación existe generalmente de uno a tres días después de que el suelo haya sido totalmente mojado por la lluvia o el riego. No es un verdadero valor de equilibrio, sino solo una condición de un movimiento de agua tan lento que el contenido de humedad no cambie apreciablemente de una medida a otra.

Richards y Weaver (1944) encontraron que, en promedio el contenido de humedad de 71 suelos distintos expuestos a una lámina de diferencial de presión de 0.33 barios, se aproximaba al equivalente de humedad a capacidad de campo (14).

2.7.6.2 Punto de marchitez permanente

Es el contenido hídrico del suelo con el que las plantas permanecen permanentemente marchitas. Como el punto de marchitez permanente es un valor dinámico que depende del suelo, de la planta y del clima, para muchos propósitos es mejor referirse a un valor de equilibrio que tiene lugar en el mismo rango del contenido de humedad.(11).

Algunos investigadores como Richards y Wadleigh (1952) han determinado que el potencial del contenido hídrico del suelo en el punto de marchitez permanente se aproxima a un valor entre -10 a

-20 barios, con un promedio de aproximadamente -15 barios. Por consiguiente, el porcentaje de agua a -15 barios ha sido identificado como el punto de marchitez permanente (14).

2.7.6.3 Agua fácilmente aprovechable

Esta expresión, se refiere a la disponibilidad de agua del suelo para el crecimiento de las plantas, está considerada como la cantidad de agua retenida en un suelo entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente (14).

2.7.7 Ley de Darcy

Si se considera un lecho de filtro de sección transversal "A" y espesor "d", que filtra el agua verticalmente con un tirante "H₁" que está sobre la superficie superior y dejando la superficie inferior con una carga "H₂." Darcy midió la cantidad de agua "Q" que se filtraba en un tiempo "t" y mostró que:

$$Q/t = K.A (H_1 + d - H_2) / d \quad (2.2)$$

en donde "K" es una constante que se define como "un coeficiente que depende de la naturaleza de la arena" y en otra forma, como "un coeficiente que depende del grado de permeabilidad de la arena"

Luego de algunos reajustes se llega a la siguiente expresión:

$$V = -K \text{ grad } \phi, \text{ con } \text{grad } \phi = (\phi_1 - \phi_2) / d \quad (2.3)$$

Si el patrón de distribución del flujo en un cuerpo es complicado y las velocidades y los gradientes de potencial varían tanto en dirección como en magnitud de punto a punto, siempre es posible seleccionar un elemento de volumen tan pequeño, que tales variaciones sean poco importantes dentro de sus fronteras. Los valores de "v" y de grad ϕ , tienen significación en el "punto" ocupado por este elemento de volumen; mientras que para el cuerpo como un todo se puede asignar un significado solo a los valores promedios y la ley de Darcy nada tiene que decir acerca de la relación que existe entre los valores promedio. La ecuación anterior es por lo tanto la generalización apropiada de la ley de Darcy, para usarse cuando el flujo del líquido no está confinado a una sola dirección en todos los puntos.

De acuerdo a las ecuaciones de Stokes-Navier, la velocidad del flujo es proporcional a la diferencia de potencial, así se tiene que:

$$V_1 d_1 = V_2 d_2 \quad (2.4)$$

Es decir, si todos los demás parámetros son iguales, la velocidad del flujo es inversamente proporcional al espesor del lecho. Esto junto con la proporcionalidad de la diferencia de potencial y la superficie de la sección transversal, abarca el contenido de la ley de Darcy (16).

2.7.7.1 Permeabilidad y conductividad hidráulica

La constante K de la ley de Darcy expresa una interacción entre el cuerpo poroso y el fluido que pasa, y expresa la facilidad de ese cuerpo en particular, para dejar que el líquido en si, fluya a través de el, para un determinado gradiente de potencial (16).

2.7.7.2 Ecuaciones de flujo y relaciones reciprocas básicas

Darcy (1856) demostró que, con velocidades del flujo suficientemente bajas, la descarga o gasto "Q", varía directamente con la pérdida de carga "H₁" y "H₂" por lo tanto:

$$Q = KA (H_1 + H_2) / L \quad (2.5)$$

donde "Q" es el volumen de agua descargado por unidad de tiempo. "H₁" es la carga hidráulica en el extremo de entrada, y "H₂" la carga hidráulica en el extremo de salida; "K" es la conductividad hidráulica, "L" es la longitud del flujo y "A" es el área de la sección transversal.

Forchheimer (1914) planteó la ecuación de Darcy por primera vez en forma generalizada para flujo tridimensional (16), así se tiene:

$$V = -Ki \quad (2.6)$$

en la que V = velocidad del flujo efectivo o macroscópico, $i = dH / dl$ = gradiente hidráulico, y K = constante hidráulica.

2.7.7.3 Relación entre el flujo y el tamaño y forma del poro.

Las partículas de agua, al moverse a través del medio poroso, describen trayectorias o caminos de acuerdo con la colocación individual de poros y partículas. A pesar de esta complejidad del flujo microscópico, la descarga efectiva o flujo macroscópico se puede expresar y describir adecuadamente en términos de la ley de Darcy, que asienta que la velocidad macroscópica o efectiva del flujo es proporcional a la fuerza impulsora (16).

2.7.7.4 Heterogeneidad de materiales porosos

En la teoría del flujo de líquidos a través de medios porosos y en el desarrollo de métodos para medir la permeabilidad, una de las suposiciones básicas que generalmente está involucrada, es la de que el medio poroso es homogéneo.

2.7.7.5 Conductividad hidráulica en suelos no saturados.

La no saturación de un suelo implica que éste experimente succión en todas partes, por lo que la diferencia de potencial entre dos puntos de una columna de suelo se debe mantener, no por cargas diferentes de presión hidrostática positiva, sino por las diferentes succiones impuestas.

La dificultad de este análisis está en que la succión, en general variará a lo largo del eje de la columna de suelo, también lo hará tanto su contenido de humedad como la conductividad hidráulica. Como la velocidad de flujo constante es la misma en todas partes, resulta que el gradiente de potencial varía a lo largo de la columna de suelo, siendo alto cuando la conductividad es baja y viceversa.

Por lo tanto la conductividad en un contenido de humedad dado se debe obtener midiendo el gradiente de potencial en el punto en donde prevalece ese contenido de humedad.

Cuando el agua se mueve a lo largo de una columna de suelo de contenido de humedad variable, la ley de Darcy se puede expresar en términos del gradiente del perfil de humedad (es decir el gradiente del contenido de humedad), lo mismo que, - o en lugar de - en términos de gradiente de potencial (Childs y Collins-George 1950) (16).

2.7.7.6 Conductividad capilar y difusividad

La relación entre la velocidad de flujo del agua y la del gradiente hidráulico (i) se toma para expresar los flujos saturados de acuerdo con la ley de Darcy que se muestra en la fórmula 2.6., donde K es la conductividad hidráulica constante para una condición dada de suelo y agua, condición creada para un material poroso, isotrópico y homogéneo (Swartzendruber 1966) indica que en suelos no saturados se supone que la conductividad hidráulica es función del volumen de contenido de agua (θ).

Asumiendo que el flujo se da en dirección vertical y que ϕ es el gradiente de presión o carga hidráulica y ψ es el gradiente de presión, que en la realidad es una gradiente de succión y por lo tanto será negativo (11, 16). De esta forma se tiene:

$$\Delta\theta / \Delta X = \Delta\psi / \Delta X \quad (2.7)$$

de tal manera que la ecuación de Darcy se transforma en:

$$V = -K \cdot \Delta\psi / \Delta X \quad (2.8)$$

asumiendo que K esta en función del contenido de humedad (θ); se puede decir además que el valor de la succión (ψ), está en función del contenido de humedad, se tiene entonces que:

$$\Delta\psi / \Delta X = (\Delta\psi / \Delta\theta) \cdot (\Delta\theta / \Delta X) \quad (2.9)$$

y tomando en cuenta que el producto de K ($\Delta\psi / \Delta\theta$) es también una propiedad del tipo de suelo y una función del contenido de humedad del mismo, esta expresión puede ser representada por D en una nueva ecuación:

$$V = -D \cdot \Delta\theta / \Delta X \quad (2.10)$$

donde D recibe el nombre de coeficiente de difusión que como se mencionó es función del contenido de humedad del suelo.

En este caso la difusividad esta dada por la siguiente ecuación:

$$V = -K \cdot \Delta\psi / \Delta\theta \quad (2.11)$$

donde K es llamada "Conductividad capilar" y varía tanto con el contenido del agua como con la succión (11).

2.8 Las arcillas del suelo

En los suelos intemperizados se forman un grupo importante de minerales secundarios a partir de los productos de descomposición de los minerales primarios. Este grupo de minerales lleva el nombre de colectivo de arcillas. La fracción arcilla está compuesta por parte del mineral amorfo mezclado con varios minerales cristalinos (11)

La fracción arcillosa proporciona la mayor parte de la superficie interna del suelo, y por lo tanto controla las propiedades importantes de éste (14).

Los minerales arcillosos cristalinos se dividen en tres grupos que dependen de la estructura del cristal de arcilla: grupo de la caolinita, grupo de la montmorillonita y el grupo de la illita.

2.8.1 Grupo de la caolinita

La fórmula tiene igual cantidad de sílice y alumina, y el sistema no se dilata. El grupo de la caolinita está formado por minerales con una capa de tetraedros de sílice y otra de octaedros de aluminio, formando juntos una unidad cristalina ya que tiene átomos de oxígeno comunes entre los octaedros de aluminio y los tetraedros de sílice.

Como resultado del sistema, se presenta una relación de laminas de sílice y aluminio de 1:1, y la tendencia a la condensación; el tipo caolinitico presenta poca expansión (11, 14).

2.8.2 Grupo de la montmorillonita

La fórmula tiene dos silices por una alumina y su sistema se dilata. Cuando dos hojas de silicato forman un cristal molecular con una hoja de gibsita entre ellas, resulta un material arcilloso del tipo 2:1. De esta forma el mineral formado tiene la libertad para hincharse y dilatarse, estos pertenecen al grupo de la montmorillonita.

La arcilla se encoge y se dilata conforme cambia el contenido en agua, así los suelos que comprenden grandes proporciones de esta se hinchan y se encogen señaladamente con los cambios de hidratación (11, 14).

2.8.3 Grupo de la Illita

Estos minerales se parecen mucho a los del grupo de la montmorillonita excepto en que las valencias están neutralizadas por un ion K^+ con un número de coordinación de 12; este actúa como un puente para mantener juntas las laminillas y tiende a evitar la expansión del cristal (anexo 1).

Muchas propiedades de los suelos son afectadas por el tamaño y tipo de mineral arcilloso dominante. Estas propiedades son: densidad aparente, área específica, retención de humedad, permeabilidad de agua y aire, expansibilidad, conductividad térmica y resistencia al corte (11, 14).

2.9 Tecnología cerámica

La cerámica se puede definir como el arte de fabricar objetos de arcilla o de loza, o como el arte de fabricar todo tipo de objetos de barro, loza y porcelana. En la época actual la cerámica se ha

convertido en una tecnología la cual ha tenido aplicación en muchos campos de la ciencia como electrónica, ortodoncia, química, aeronáutica y otros.

A continuación se describe de una manera breve algunos de los principios que rigen los procesos de elaboración de piezas cerámicas según Singer y Singer (22).

2.9.1 Colada

Básicamente el proceso de la colada consiste en la adición cuidadosa de productos químicos a las pasta para producir una barbotina que tenga buenas propiedades de flujo con un contenido de agua mínimo, la cual se transporta y vierte en moldes de yeso, donde la pasta se endurecerá.

El régimen de colada puede dividirse en dos partes:

- a. El período inicial de colada durante la formación de una capa fina sobre la superficie del molde.
- b. El período durante el cual disminuye la velocidad de endurecimiento a medida que aumenta el espesor de la colada. Este determina el régimen de la colada en piezas gruesas.

Tres factores principales afectan el régimen de colada:

1. La relación arcilla-agua (peso por unidad de volumen) de la barbotina.
2. El tamaño de grano de los constituyentes de la barbotina, que en el caso de la arcilla está relacionado directamente con el alcance de la desfloculación.
3. La naturaleza específica del desfloculante.

2.9.1.1 Comportamiento de una colada

La preparación de una buena barbotina para colada a partir de pastas que contengan arcilla no es siempre una materia fácil, ni es tampoco materia respecto a la cual puedan establecerse reglas o métodos determinados. No solo es diferente cada arcilla si no que la misma, junto con las restantes materias primas minerales y en particular el agua sufren continuas variaciones.

Las condiciones óptimas para convertir una pasta determinada en una buena colada han de hallarse experimentalmente. Ha continuación se describen las condiciones más relevantes.

Debe ser posible producir una barbotina con propiedades satisfactorias de flujo y colada, con un contenido de agua bajo y no más del 2% superior al de la pasta plástica de composición semejante, en general estas cantidades caen dentro del intervalo siguiente:

Arcilla refractaria	16-18%
Gres	20-22%
Loza y porcelana vítrea	23-28%
Porcelana dura	28-30%
Porcelana de huesos (sin desfloculantes)	50.5%
Porcelana de huesos (con silicato sódico)	35.5%

Como cada arcilla reacciona de un modo distinto con los diversos desfloculantes, es siempre conveniente ensayar un gran número de ellos en diferentes cantidades y combinaciones cuando se prepara un nuevo proceso.

El agua a no ser que se desmineralice especialmente será un factor variable. Esto se aplica en particular a cualquier agua que se recicle dentro del proceso, puesto que contendrá mayor cantidad de materias disueltas después de cada nueva utilización.

Una vez que se han comprobado la fluidez y viscosidad de una barbotina deben investigarse su comportamiento en el transcurso del tiempo. Por ejemplo las reacciones que se producen cuando se dejan en reposo durante 24 horas una suspensión aparentemente satisfactoria, si forma una piel o se endurece en toda su masa y si ocurre esto último, comprobar si se licúa por agitación. Una suspensión tixotrópica que se endurezca rápidamente cuando se deja en reposo puede ser perjudicial. Por otra parte una ligera tixotropía en la barbotina para colada puede ser ventajosa en el endurecimiento verdadero de la colada.

La consistencia a buscar debe ser tal que cuando se remueva a fondo la suspensión con una varilla de vidrio, el surco dejado tras la varilla debe cerrarse inmediatamente. Si se toma con la varilla una pequeña cantidad, deberá escurrir de ella al principio en largos cordones y después en gotas regulares de forma alargada, no quedando nada adherido a la varilla de vidrio. La barbotina que cae de la varilla sobre la superficie general de aquella debe incorporarse a ella inmediatamente y no quedar como un montón sobre la superficie.

En el proceso de colada deben considerarse las propiedades de endurecimiento de la barbotina.

Existen dos métodos principales de colada. El primero, colada hueca o de vertido, emplea moldes que le dan la forma exterior de piezas huecas. Se introduce la barbotina para colada y el molde absorbe agua de la misma, de tal manera que se forma sobre la superficie del molde una pasta más seca. Cuando ésta capa alcanza el espesor requerido se vierte la barbotina y se deja que se seque la

colada. El segundo método de colada sólida emplea moldes que determinan las formas de todas las superficies, de tal modo que todo el espacio comprendido entre ellos se llena con la colada. En ambos casos es deseable que la barbotina adquiera una solidez suficiente para su extracción del molde lo más pronto posible, pero es particularmente en el primer método, en el que son perjudiciales las barbotinas tixotrópicas.

En la solidificación de barbotinas para colada en moldes de escayola están implicados varios factores:

1. La acción floculante del sulfato de calcio. Esta es considerada por gran número de autoridades como el factor principal, y se demuestra por el hecho de que una barbotina para colada se endurecerá incluso en un molde de escayola húmedo, y no lo hace de modo satisfactorio en un molde poroso de otro material.
2. La absorción de agua por el molde de escayola. Este es indudablemente un factor importante, y por consiguiente es de gran importancia que los moldes estén en perfectas condiciones, con porosidad regular.
3. La tixotropía que permite que una pasta de arcilla sea rígida aun cuando una capa de agua separe las partículas sólidas. Este factor es aplicable solo en ciertos casos. Si es elevada, la pieza es relativamente plástica y fácil de cepillar y unir, si es baja la colada es muy dura y el cepillado lleva consigo el corte transversal de partículas sólidas, pudiendo redundar en resentido y cuarteado.
4. La velocidad a la que puede pasar el agua a través de la capa de arcilla ya formada entre la barbotina y el molde, lo cual determina la velocidad a la que puede formarse la colada. Las arcillas de grano fino presentan más resistencia al paso del agua que las de grano grueso, por lo

que en general las tierras de porcelana primarias y los caolines constituyen mejores arcillas para colada que las arcillas sedimentarias finas.

5. El desfloculante utilizado. Se puede conseguir una mejor moldeabilidad utilizando juntamente carbonato y silicato de sodio. Por ejemplo, una barbotina desfloculada con carbonato exclusivamente, utilizada para colada por vertido, puede dejar estrias en el interior de la pieza y secarse difícilmente. Cuando se sustituye una pequeña cantidad de carbonato por silicato se obtiene una colada satisfactoria. Pero si se utiliza demasiado silicato, la capa inicial de la colada se vuelve impermeable y se reduce la velocidad de endurecimiento.

Otro factor a considerar es la facilidad de extracción de la pieza colada del molde. Una barbotina excesivamente desfloculada tiende a pegarse al molde. Por consiguiente es preferible producir una barbotina que tenga viscosidad solo ligeramente superior al valor mínimo.

2.9.1.2 Defectos de la colada

Cierto número de defectos en los materiales operan exclusivamente en piezas producidas por el proceso de colada. Dichos defectos se deben a la composición incorrecta de la pasta, desfloculantes inadecuados, viscosidad errónea, procedimientos irregulares en el llenado de moldes y moldes defectuosamente contruidos o secados.

2.9.2 Escayola

La escayola (Plaster o yeso de París) es esencialmente sulfato cálcico semihidratado, $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$. Se obtiene a partir del mineral yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, el cual se puede encontrar prácticamente puro, como con diversas impurezas que lo colorean y modifican las propiedades de la escayola obtenida de él. Las formas en las que se puede presentar el sulfato de calcio dependen de su contenido de humedad y son las siguientes:

Yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$, peso molecular de 172,18, CaSO_4 79,1% y H_2O 20,9%.

Escayola, $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$, peso molecular de 145,16, CaSO_4 93,8% y H_2O 6,2%.

Anhidrita, CaSO_4 , peso molecular de 136,15, CaSO_4 , 100%.

La obtención de escayola satisfactoria a partir del yeso se ve complicada por el número de productos de deshidratación posible. Existen dos semihidratados, α y β ; la forma α da lugar a escayolas más resistentes y más satisfactorias, y es por lo tanto, el producto de deshidratación deseado. El sulfato de calcio semihidratado α se forma por recristalización del yeso a partir de agua por encima de 115 °C, en una atmósfera suficientemente húmeda. En cambio la forma β , se forma cuando se calienta rápidamente el yeso en una atmósfera seca por encima de 100 °C.

2.9.2.1 La escayola en la elaboración de moldes

El yeso calcinado o escayola absorbe fácilmente agua y se rehidrata, recristalizando como yeso en cristales entrelazados que después fraguan en forma de una masa dura. La cantidad de agua requerida para llevar 100 partes de escayola a una fluidez estándar se denomina la "Consistencia normal", teniendo que para la elaboración de moldes para vaciado de barbotina se utilizan 90

partes de agua para 100 partes de escayola. Se dice que una pasta de escayola es muy plástica si cuando se fuerza a pasar a través de un orificio presenta una superficie limpia y continua, por ende la pasta no será pegajosa ni arenosa. Al tacto es blanda y aterciopelada.

El tiempo de fraguado de la escayola es de aproximadamente de 15 a 30 minutos. Cuando la escayola ha fraguado el agua combinada se evapora, dejando poros abiertos. Por lo tanto cuanto más agua se añada al mezclar la escayola, tanto más poroso será el molde fraguado, y caso contrario cuando menos agua se utilice el molde será más fino y poseerá menos poros, por lo que tendrá menos absorción. Dentro de los usos que se le da a la escayola en la industria cerámica se tiene la fabricación de moldes para colada con barbotina.

2.9.2.2 Funciones del molde de escayola dentro de la cerámica

En el proceso del moldeado, el molde de escayola juega un papel importante; no solamente absorbe agua para ir endureciendo la arcilla, sino que a través de la ligera la solubilidad del sulfato de calcio en el agua que acompaña a la arcilla, el molde proporciona iones flocculantes, siendo flocculantes eficientes tanto el ion calcio como el ion sulfato. Por lo tanto, una barbotina de colada desfloculada, vertida en un molde de escayola, se floccula en la superficie del molde para dar un producto moldeado duro. Se puede decir que los moldes presentan una triple acción en el moldeo de materiales cerámicos: recipientes, flocculantes y deshidratantes.

Los moldes bien cuidados pueden durar 200 o 300 coladas y en casos excepcionales hasta 1000 moldeos plásticos.

2.9.3 La desfloculación

Con el proceso de la desfloculación se puede obtener una barbotina con propiedades satisfactorias de flujo y colada el cual permite la utilización de menores proporciones de agua y más arcilla, este proceso utiliza compuestos los cuales pueden ser ácidos, bases o sales.

Los dos desfloculantes tradicionales son el carbonato sódico (cenizas de sosa) y el silicato sódico (de composición $\text{NaO} \cdot 3 \text{SiO}_2$), y la mayoría de las pruebas se inician empleando cantidades variables de estos compuestos.

El factor básico en la desfloculación de una arcilla o pasta de arcilla es por supuesto, la presencia de partículas coloidales que sean susceptibles a la acción de los productos químicos que se añaden; la fluidez de una barbotina depende de la repulsión entre dichas partículas, y la viscosidad mínima esta determinada por la cantidad total de coloides de arcilla presentes y por su naturaleza.

Si una pasta es de baja plasticidad y tiene poco coloide protector, el desfloculante principal debe ser silicato sódico o alguna sal similar que produzca por hidrólisis coloides protectores. Si la pasta tiene una plasticidad relativamente alta y un contenido elevado de coloide protector, el desfloculante principal deberá ser sosa calcinada o alguna sal similar que no produzca por hidrólisis coloides protectores.

Con frecuencia es ventajoso emplear mezclas de desfloculante, determinándose experimentalmente sus proporciones relativas y cantidad total.

La cantidad de desfloculante requerida son generalmente de 0.05 a 0.20% del peso de arcilla seca, y vienen en gran parte determinadas por el tipo de mineral de arcilla. Los caolines no deben tener mas de 0.1% de desfloculante, en tanto que otras arcillas precisan hasta 0.2% y en ningún caso deben añadirse más de un 0.3%.

Cuando ninguna combinación de desfloculantes y de sus compuestos auxiliares sea capaz de producir una barbotina adecuada para colada, podrá demostrarse en general que la arcilla contiene montmorillonita. Cuando han de utilizarse tales arcillas debe desactivarse la montmorillonita cálcica, con ácido carbónico. Evidentemente éste ocupa las posiciones que de otro modo ocuparían los cationes alcalinos y el agua. Si ha de desactivarse una montmorillonita sódica primeramente deberá ser reemplazado el sodio por el calcio.

Las arcillas montmorillonitas desarrollan el efecto sobre atracción entre las partículas de arcilla, siendo los cationes los que disminuyen la adhesión en los bordes para formar la estructura reticular del gel tixotrópico, aumentando las roturas o cizallamiento en un cuerpo cerámico y por consiguiente la adhesión del mismo al molde de escayola.

2.9.4 Cochura o quema

Los materiales cerámicos deben, sufrir al menos una cochura que convierte el material moldeado irreversiblemente en un producto, resistente al agua y a los productos químicos.

Los materiales vidriados se cuecen tradicionalmente dos veces. En primer lugar sufren la cochura de bizcocho, en la cual la pasta madura por completo y luego se somete a una segunda cochura, la de vidriado, la cual se realiza a una temperatura inferior a la de bizcocho, con la que madura el vidriado.

En el caso de la arcilla de la porcelana dura la cochura de bizcocho no madura la pasta, obteniéndose un artículo poroso. En este caso se efectúa la cochura de vidriado a una temperatura más elevada, madurando así simultáneamente pasta y vidriado.

La tendencia moderna persigue la eliminación de la segunda cochura y el vidriado del material crudo, de tal forma que pueda acabarse éste en una sola cochura; tales materiales se denominan de un solo paso.

La cochura de pastas cerámicas es generalmente más compleja por tratarse de mezclas, e implica reacciones completas e incompletas, rápidas y lentas, etc. en particular la cochura de materiales cerámicos no implica simplemente llevarlos a una temperatura elevada deseada, sino que siempre son importantes las velocidades de calentamiento y enfriamiento.

Al estudiar la curva de porosidad de la pasta, podrá encontrarse la temperatura máxima a la cual pueden moverse los gases a su través. La combustión a temperaturas más bajas aprovecha las mejores condiciones de la porosidad, en la pasta. Con la utilización de las curvas puede observarse que con temperaturas de 800 a 900 °C un % de porosidad adecuado. (anexo A-2).

2.9.5 Formación de porosidad

Para la formación de pastas porosas permeables se han desarrollado varios métodos con el fin de crear poros que estén conectados y con tamaños regulados. Estos métodos son principalmente tres:

- a) Cesación de la cocción antes de que se produzca la vitrificación.
- b) Inclusión de material volátil y combustible.
- c) Aglutinación con chamota de tamaño uniforme.

2.9.5.1 Material no vitrificado

Al cesar el calentamiento de las piezas antes de que se produzca la vitrificación, se induce a la formación de porosidad, además en este proceso se utiliza una menor cantidad de material fundente en la mezcla. Este mecanismo tiene que ver con la eliminación del agua higroscópica, la cual deja una pasta relativamente porosa.

2.9.5.2 Inclusión de material volátil o combustible

Generalmente son utilizados materiales orgánicos los cuales son eliminados por combustión durante el proceso de cocción, algunos de éstos materiales son: hulla, lignito, coque, brea, aserrín, corcho, carbón de madera, papel, paja, broza entre otros.

2.9.5.3 Incorporación de chamota

Consiste en la adición de materiales calcinados previamente (cuidadosamente preparados y clasificados), a la mezcla, lo cual provoca un efecto en el ordenamiento interno de las partículas de arcilla provocando una mayor porosidad de las piezas.

2.10 Investigaciones realizadas sobre el tema

A mediados de la década de los 70, el Colegio de posgraduados de Chapingo (México), introduce la tecnología desde el viejo mundo, en su forma original, realizando estudios y modificaciones; así

tenemos que los estudios iniciales sobre el desenvolvimiento de este método fueron realizados en México por Olguín (1975), el cual experimentó en condiciones de invernadero con cápsulas porosas en forma de cono truncado, construidas de arcilla cocida y con una capacidad de 300 cc. Este autor utilizó el frijol (Phaseolus vulgaris) como planta indicadora y reporta que el desarrollo del cultivo fue satisfactorio, observándose una concentración del sistema radicular en la zona del bulbo de mojado. Recomienda el uso de tuberías negras para evitar el desarrollo de algas. Encontró además, que el flujo a través de las cápsulas porosas puede describirse mediante la ley de Darcy, ya que el gasto fue proporcional al gradiente.

Mas tarde Olguín (1976), observó la operación del sistema de riego por succión¹ en condiciones de campo, utilizando el cultivo de maíz (Zea mais) y comparándolo contra un sistema de riego por goteo del tipo microtubo, llegando a la conclusión de que el sistema por succión consumió menos agua y siguió hasta cierto punto las tendencias de la evaporación, además que el rendimiento de riego por succión fue mayor que el rendimiento bajo riego por goteo (29).

García (1977), estudió el efecto del riego por succión sobre la potencialidad del rendimiento de la fresa, y la eficiencia en el uso del agua. Utilizó cápsulas porosas de 626 cc de capacidad, con 6 tratamientos, 3 niveles de fertilidad y dos densidades de población. Encontró que a mayor densidad de población, hubo mayor rendimiento y que el sistema fue capaz de abastecer la demanda, además, el riego por succión resultó ser 7.9 veces más eficiente que el superficial en la producción de fruto por m³ de agua aplicada (29).

Valle en 1977, trabajó en el diseño y construcción de cápsulas porosas en forma cilíndrica, con el objetivo de abaratar el costo de producción, las cápsulas fueron conectadas individualmente a la

¹El riego por succión es una modalidad del riego por cápsulas porosas de arcilla, en el cual se aprovecha la succión producida por las partículas del suelo que se encuentran en torno a la cápsula, siendo esta la única razón del establecimiento del flujo de agua o riego.

fuelle de abastecimiento por medio de tubo médico de 3/8" de diámetro. Al mismo tiempo durante la evaluación éste alcanzó un punto de equilibrio en la relación agua-suelo-planta, a los 38 días después de instalado el sistema, utilizando cargas hidrostáticas negativas de -10, -15, -20, -25 y -30 cm; alcanzando el bulbo húmedo 45 cm de diámetro, en diferentes períodos de tiempo para los suelos en estudio; encontrando un modelo matemático que describe la distribución de la humedad del suelo (29). Determinó un procedimiento para elaborar las cápsulas y abaratar su costo, y generó nuevas ideas para hacer flexible este método de riego con el objeto de cubrir varias necesidades de uso consuntivo.

Rendon (1979), trabajó en el desarrollo, calibración y prueba de un modelo matemático para tratar de representar el flujo de agua a través de la cápsula porosa y su distribución en el suelo circundante, tomando en consideración las propiedades físicas de la cápsula y del suelo, altura de succión, demanda evapotranspirativa y el patrón de extracción de agua del cultivo; trabajando con el diseño de forma cilíndrica, obteniendo conductividades hidráulicas promedio de 0.0057 cm/hr (29).

Hernández (1979), evaluó el método de riego por succión contra el de surcos, utilizando como planta indicadora la lechuga (Lactusa sativa). El análisis estadístico reportó que no existía diferencia significativa entre los tratamientos evaluados, aunque las parcelas de riego por succión nunca manifestaron deficiencias de humedad. Se comprobó además, que la fertilización a través del sistema de riego por succión tiene efecto rápido y eficiente. Este autor incorporó a su estudio, la aplicación de una carga hidráulica positiva (29).

Ya para 1978, esta tecnología había llegado hasta Brasil, y fue Silva et al. quienes en ese año comprobaran la economía de agua que se obtenía al utilizar este método, el cual evaluó en el cultivo de melón (Cucumis melo) (23). Las cápsulas contenían cuatro orificios, dos inferiores y dos

superiores, fabricadas de arcilla pura, no expansible, quemada a 850 °C. El sistema consistía en una serie de cápsulas interconectadas con mangueras de polietileno, conectada a una fuente de abastecimiento situada de 30 a 50 cm abajo del nivel de la cápsulas. Se tubo problemas con respecto a la cantidad de tubería que demandó el sistema, lo cual aumentaba los costos.

En el período de 1979 a 1983, se realizaron ensayos por Souza en la estación experimental de Bebedouro, Petrolina, Estado de Pernambuco en el nordeste de Brasil de la Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (EMBRAPA), la cual supo reconocer el gran valor social y ecológico de la tecnología la cual adaptaron y mejoraron. El sistema así desarrollado era similar al de Chapingo, solo que aquí las cápsulas porosas estaban interconectadas por medio de tubos de plástico, se uniformizó la permeabilidad de las cápsulas y se le aplicó una carga hidráulica positiva por medio de depósitos de distribución principal. Las cápsulas fueron dispuestas en el campo a distancias iguales, cada 2 mts; enterradas a una profundidad de 10 cm, siguiendo curvas de nivel (24). Las presiones hidrostáticas ensayadas (0.35 m a 2.8m) no influenciaron significativamente en el rendimiento de los cultivos; entretanto, se vio afectada a un nivel del 1% de probabilidad, en la liberación de agua diaria, por unidad porosa. Los cultivos usados fueron la sandía (*Citrulus vulgaris*), variedad Charlenton Gray, melón (*Cucumis melo*) variedad Valenciano amarillo y Maíz (*Zea mais*) variedad Centralmex. Los costos del sistema por hectárea fueron de US \$ 1,677.41.

En 1982, Sousa et al. en el trópico semiárido de Brasil, evaluaron la eficiencia en el uso del agua para varios sistemas de irrigación usando como cultivo de referencia el maíz (*Zea mais*), obteniendo las mayores eficiencias con el método de cápsulas porosas (2.7 y 2.0 Kg de grano por m³ de agua), superando al sistema por goteo (1.4 Kg/m³) hasta en un 92%, siendo esta diferencia aún mucho mayor para otros métodos de tipo convencional (24).

Silva et al. (1985), experimentaron la posibilidad de uso de materiales locales como el "tagua", un material arcilloso del tipo sedimentario, el cual contiene principalmente arcillas ílticas muy plásticas, de bajo punto de fusión, además se utilizó calcita, talco y tagua calcinado, con las que elaboraron dos barbotinas que utilizarían como materia prima básica para la confección de las cápsulas porosas para fines de irrigación. Las cápsulas fueron confeccionadas por medio del método de colado de las barbotinas (mezcladas según las proporciones) en moldes de yeso. Se efectuaron ensayos de liberación de agua aplicando cargas hidráulicas positivas de 0.25, 0.50, 0.75 y 1.0 m , con resultados dentro del rango de 0.1 a 36 litros por día y valores de conductividad hidráulica de 0.0054 hasta 0.0007 cm/hr, basándose éste también en conductividades hidráulicas obtenidas por Santos, cuyos valores oscilaban entre 0.004 y 0.008 cm/hr. Utilizaron la forma de cono truncado para las cápsulas y realizaron modificaciones en la forma del entubado, permitiendo un ahorro del 50% de la tubería necesaria para la instalación del sistema (23).

Para el año de 1984 un equipo del Proyecto Regional Mayor (PRM) de la UNESCO, comenzó sus estudios en la zona de Sauzalito, Provincia del Chaco, República de Argentina; en esta ocasión Vargas, encontró que la principal limitación del sistema desarrollado en Brasil era el costo de las cañerías plásticas que unen los distintos pitones, de este modo se conformó la idea de los caños cerámicos porosos de arcilla, los cuales fueron confeccionados usando técnicas tradicionales con distintos aditivos para lograr una porosidad adecuada. Se efectuaron pruebas de caudales a distintas presiones hidrostáticas, obteniéndose valores entre 1 y 34 litros por día por cada metro de caño. Los caños son de 2.5 cm de diámetro externo y un espesor de pared de 4 mm, además se utilizaron temperaturas de cochura de 800, 900 y 1000 °C; el aditivo utilizado en este caso es el estiércol de bovino en una proporción del 20% que permite una masa moldeable manualmente y evita rajaduras en el proceso de secado de los caños previo a la cochura (25).

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Generalidades.

El ensayo se realizó en cuatro fases, comprendiendo cada una de ellas, diferentes procesos y metodologías aplicadas con el objeto de obtener una cápsula que pueda ser utilizada con fines de irrigación.

3.1.1 Fase de Diseño.

La cual fue desarrollada en forma analítica y práctica. La forma analítica se realizó en base al análisis de antecedentes de la literatura obtenida. La forma práctica se desarrolló en diferentes talleres artesanales de cerámica (propietario Sr. Cruz Cuellar Chacón), ubicados en el municipio de Ilobasco, departamento de Cabañas, y en talleres de cerámica tecnificada (propietario Sr. Cesar Alberto Cruz) ubicados en la zona norte de la ciudad de San Salvador. El objetivo de dicha fase fue el de ensayar diferentes diseños, materiales y metodologías de construcción de las cápsulas.

3.1.2 Fase de Construcción.

Desarrollada en la cerámica "Arte Colonial" tecnificada (propietario Sr. Nicolas Santos), ubicada en el pasaje Arte Colonial de la colonia Zacamil, municipio de Mejicanos, departamento de San Salvador, en esta fase se llegó a determinar con precisión los materiales y el método definitivos para la construcción de las cápsulas.

3.1.3 Fase de Laboratorio.

Esta fue desarrollada en los laboratorios de la Unidad de Química y del Departamento de Suelos de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, durante la cual se determinaron valores para el cálculo de GEA, GER, textura y constantes hídricas en los suelos utilizados en la determinación de bulbos de humedecimiento; al mismo tiempo se determinaron algunas propiedades de las cápsulas como la densidad y porosidad.

3.1.4 Fase de evaluación.

Esta se llevó a cabo en el Propagador del Departamento de Suelos de la Facultad de Ciencias Agronómicas y se dividió en dos partes:

- a. Evaluación de las liberaciones de agua en las cápsulas porosas construidas con diferentes niveles de aditivo.
- b. Evaluación del bulbo de humedecimiento en tres diferentes texturas de suelo con la mezcla seleccionada en la fase anterior.

3.2 Metodología de diseño

La metodología utilizada en el proceso de diseño de las cápsulas ha estado fundamentada en los ensayos prueba-error, tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- Que la cápsula tuviese una forma regular, la cual se pudiera obtener fácilmente con un molde de dos piezas, evitando de esta forma posteriores complicaciones en su elaboración, con el consiguiente ahorro de trabajo.
- Que contara con dos protuberancias tubulares en su parte superior de tal manera que éstas quedaran dispuestas diametralmente para facilitar el entubado en serie y que su posición evite la formación de espacios de aire o al menos que éstos sean mínimos.
- Que su forma presentara el mínimo de inconvenientes para el desmoldado de la cápsula ya terminada, pues de lo contrario se tendría que proceder a retocar las cápsulas con el inconveniente de pérdida de tiempo y las posibles fallas en su estructura al momento del secado o la quema.
- Garantizar un grosor uniforme en las paredes de la pieza terminada, evitando además los bordes muy agudos o estructuras muy pronunciadas.
- Ya que la cápsula está destinada a funcionar dentro de la tierra, ésta debería contar con una forma que le diera la mejor resistencia estructural, independientemente de los materiales de los que estuviese construida.
- Dependiendo de la permeabilidad obtenida, estudiar la posibilidad de reducir las dimensiones de la cápsula hasta donde sea posible, de manera que ésta pueda resultar en un menor costo, conservando su forma.
- Que el tamaño de éstas no constituyera una limitante en cuanto a lo económico, de tal manera que pudieran ser costeables por los productores, sin menoscabo de su funcionalidad.

3.2.1 La forma de la cápsula

Determinados los criterios guías, se procedió a probar con cuatro formas regulares conocidas, las cuales fueron desarrolladas utilizando diferentes métodos de construcción y materiales, dentro de las formas estudiadas tenemos: cono truncado, cilindro, esfera y ovoide.

3.2.1.1 Cono truncado

A raíz de los ensayos realizados en Ceara, Brasil por De Souza et. al., se comenzó por probar la forma de cono truncado, la cual había dado buenos resultados. La forma en mención se desarrolló bajo el método de torno de alfarero, utilizando una mezcla de "arcilla colorada" y "tierra blanca" como cuerpo cerámico. La quema se llevó a cabo con el uso de un horno artesanal de leña.

La forma de cono truncado no se probó con otros métodos ni con otros materiales, esto debido a que en esta etapa del estudio no se dominaban otras técnicas de trabajo en cerámica y se le daba énfasis al uso de materiales locales, los cuales no pueden ser trabajados con métodos más técnicos.

3.2.1.2 Cilindro

La forma cilíndrica fue probada por Valle et.al.en los ensayos realizados en Chapingo, México, obteniendo resultados bastante alentadores. Así debido a la falla del método de torno se procedió a elaborar las piezas con el método de repujado en molde, en el cual se utilizó moldes de yeso de dos partes, obteniéndose cápsulas de dos piezas, las cuales eran unidas posteriormente con el uso de barbotina. El material utilizado fue siempre la mezcla de "arcilla de Ilobasco " y "tierra blanca". El método de quema en este caso fue el de horno artesanal de leña.

3.2.1.3 Esfera

Para ésta forma solamente se procedió al análisis del diseño preliminar sin llegar a su construcción, dado que con anticipación se previó que no se podía llevar a cabo una adecuada ubicación de las protuberancias tubulares que servirían como unión con los tubos interconectores, pues éstas resultarían en estructuras complicadas.

3.2.1.4 Ovoide

Tomando como base la forma esférica y debido a algunas ventajas que ésta presentaba, se derivó una forma tal que superara la dificultad de la esfera. Se propuso entonces un ovoide (forma de huevo), el cual fue realizado mediante el método de colado con barbotina en molde de yeso y quemado en horno de gas propano. Por ser ésta la metodología que garantizó un resultado efectivo del estudio, será descrita con más detalle en las secciones siguientes.

3.3 Metodología de construcción

En esta parte se describen los diferentes materiales y métodos utilizados para la elaboración de las cápsulas porosas, así como los aditivos para formar porosidad.

3.3.1 Materiales de construcción

Los materiales de construcción utilizados en el presente ensayo fueron muy diversos, y para una mejor descripción de éstos se dividirán en dos grupos: materias primas y aditivos.

3.3.1.1 Materias primas

Son aquellos material que se conforma el cuerpo cerámico de las cápsulas o sea es la "base" de su estructura. Dentro de las materias primas ensayadas se encuentran diferentes materiales como: suelo arcilloso conocido como "arcilla de Ilobasco", ceniza volcánica y arcilla de loza.

3.3.1.1.1 Arcilla de Ilobasco

Este material arcilloso, muy plástico de color rojizo proveniente de la región de Ilobasco, departamento de Cabañas, el cual se utilizó mezclado con ceniza volcánica o "tierra blanca" (materiales estandarizados) para la formación de un cuerpo cerámico más trabajable. La proporción de la mezcla era de 50% arcilla de Ilobasco y 50% ceniza volcánica, luego de mezclado en seco se procedió a humedecer poco a poco, hasta lograr la consistencia y plasticidad deseada lo cual es un aspecto que obedece al criterio práctico del artesano.

3.3.1.1.2 Ceniza volcánica

Este material consiste en una toba pumicítica dacítica, el cual es comúnmente conocido como "tierra blanca"; ésta posee una amplia distribución en la zona central del país, y fue utilizada durante la etapa de construcción con "arcilla de Ilobasco" para formar los cuerpos cerámicos.

3.3.1.1.3 Arcilla de loza

Esta es la que tradicionalmente se utiliza para la construcción de piezas de cerámica decorativa, y consiste de una arcilla de color blanco, la cual al quemarla adquiere gran dureza. Esta arcilla es especial para el trabajo cerámico, y es elaborada en forma industrial bajo la norma ASTM D 4236", la cual es una premezcla seca y su presentación es en bolsas de 22.7 Kg.

3.3.1.2 Aditivos

Este se define como aquel material utilizado para la confección de las cápsulas que darían una determinada característica, en esta oportunidad la porosidad de la cápsula, el cual puede ser utilizado en diferentes proporciones.

3.3.1.2.1 Arena

La arena fue utilizada con la arcilla de Ilobasco y ceniza volcánica para elaboración de cápsulas con la forma geométrica de tipo cono truncado; utilizándose en proporciones de 5, 10, 15 y 20%; siendo estandarizada con una malla N° 30, para su posterior utilización.

3.3.1.2.2 Carbón de madera

Utilizado con la arcilla de Ilobasco para la elaboración de cápsulas de forma cilíndrica en proporciones de 5, 10, 15 y 20%.

3.3.1.2.3 Harina de trigo

Esta fue utilizada con la arcilla de Ilobasco, en un principio para la elaboración de cápsulas de forma cilíndrica, el cual tendría la función de dar porosidad ya que por medio de su calcinación y evaporación en forma de CO₂ lo cual se logra con una temperatura de quema superiores de los 800 °C, utilizándose proporciones de 10, 15, 20 y 25%.

3.3.1.2.4 Estiércol de bovino

El estiércol de bovino fue utilizado en la mezcla de arcilla de loza con la función de proporcionar porosidad a las cápsulas después de la quema de éstas, utilizándose una proporción de 20%; el cual fue molido con un molino de mano y luego estandarizado con malla N° 30.

3.3.1.2.5 Carbonato de calcio

Este es el que se encuentra comercialmente en presentación de 50 libras, fue utilizado con la arcilla de loza para la elaboración de cápsulas de forma ovoide en proporción del 20%.

3.3.1.2.6 Aserrín

El aserrín de pino, fue estandarizado con una malla N°30, obteniéndose un producto fino y uniforme, utilizándose con la arcilla de loza en proporciones de 10, 15 y 20%.

3.3.1.3 Otros materiales

Estos materiales son aquellos utilizados dentro de la parte estructural en la elaboración de las cápsulas, con funciones físico-químicas como floculación y desfloculación.

3.3.1.3.1 Escayola

Material utilizado en la elaboración de los moldes, el cual se encuentra en el comercio en forma de yeso calcinado, su presentación es de bolsas de 25 libras.

3.3.1.3.2 Silicato de sodio

Compuesto químico utilizado en pequeñas proporciones para darle fluidez a la barbotina; este producto es proporcionado junto con la arcilla de loza, pero puede ser adquirido por separado, dependiendo de la necesidad. Su presentación es en forma líquida.

3.3.2 Métodos de construcción

Para la construcción de las cápsulas se utilizó diferentes métodos, los cuales iban variando de acuerdo al tipo de material utilizado y a las exigencias del caso, tomando como base la experiencia acumulada. En un inicio se dio énfasis a los materiales locales, los cuales son utilizados por los artesanos menos técnicos a nivel nacional, esto a su vez, mostró la pauta para que se utilizara un método de confección que fuese coherente con el material a utilizar. Dentro de los métodos desarrollados tenemos: torno de alfarero, repujado en molde de yeso y colado con barbotina.

3.3.2.1 Torno de alfarero

Este es utilizado para trabajar con materiales cerámicos clasificados como terracota, dentro de los que están incluidos el "barro gris" y el "barro colorado" característicos de algunas regiones de El Salvador. Este método consiste en la formación de piezas de cerámica a partir de arcilla en estado plástico, colocando firmemente en el centro del plato del torno una bola de arcilla que pueda manipularse confortablemente entre ambas manos. Entonces se pone en movimiento el torno y se ejerce presión haciendo uso de los dedos de la mano derecha superpuestos a los de la izquierda. Manteniendo las palmas verticales y presionando con éstas, la arcilla se levanta y adopta la forma deseada.

La base de las piezas debe conservar suficiente espesor para permitir el corte de la cápsula cuando está lista y la formación posterior de un anillo de apoyo en la cara inferior.(8).

3.3.2.2 Repujado en molde de yeso

El repujado en molde de yeso no es mas que la adición de pequeñas porciones de material ya preparado en estado semisolido (plástico), a una superficie de yeso (molde) con la forma deseada, las cuales se van colocando de manera consecutiva y bajo el efecto de la presión de los dedos pulgares de la mano, procurando de esta manera conseguir cierta uniformidad en las paredes del objeto moldeado.

Al terminar de repujar en una parte del molde se prosigue con la siguiente de igual forma, para luego unir éstas por medio de la adición de barbotina en los bordes; posteriormente se unen las dos partes del molde a base de un poco de presión, se deja reposar por un momento y luego se

le aplica unos golpes con la mano empuñada, ésto para que el objeto moldeado se suelte del molde y por último se abre éste con cuidado para retirar el objeto.

3.3.2.3 Colada con barbotina en molde de yeso

La colada con barbotina en molde de yeso consiste en el uso de arcilla líquida o barbotina, la cual es preparada bajo determinadas especificaciones; ésta se vierte en moldes de yeso los cuales poseen la forma del objeto deseado, para ello se hace uso de moldes con orificios que permitan tal operación; cuando el molde está completamente lleno de barbotina se contabiliza el tiempo necesario para que se forme una pared de un grosor deseado, adicionando barbotina al molde para mantenerlo siempre lleno, debido a la absorción de agua que se da en el molde. Al final del tiempo se vacía el molde lo más rápidamente y luego se deja escurriendo y en reposo por otro lapso de tiempo el cual sirve para que la cápsula logre fraguar.

La apertura del molde se lleva a cabo tomando como parámetro la consistencia de la arcilla de las partes que sobresalen del molde, y cuando éstas tienen la consistencia deseada se procede a desmoldar la cápsula aplicando golpes con la mano en el molde y luego abriéndolo con mucho cuidado a fin de evitar que se resquebraje la cápsula.

3.3.3 Construcción de las cápsulas

Para la construcción de las cápsulas se empleo el método de vaciado de barbotina en molde de yeso, que es el mas indicado para el tipo de arcilla a utilizar, además proporciono una mayor uniformidad a las cápsulas, evitando el cuarteo de las piezas. A continuación se describe paso a paso la metodología de la construcción de las cápsulas.

3.3.3.1 Modelado del machote

El machote es la "cápsula original" de la cual se obtuvieron los primeros moldes; este es sólido y hecho a mano, haciendo uso de instrumentos propios del oficio de la cerámica y utilizándose como materia prima una arcilla plástica conocida como Bentonita, la cual facilitaría el trabajo de modelado.

3.3.3.2 Obtención del molde y contramolde

Cuando el machote estuvo terminado se le aplicó una película muy fina de jabón como sustancia aislante, para evitar que al momento de hacer el molde, este quede adherido al machote, de esta manera se pudo despegar fácilmente. Los moldes originales, que son los que se obtuvieron directamente del machote, fueron hechos de yeso y para la construcción se utilizó la técnica por vaciado en el machote. Para el caso particular de este trabajo se utilizó un molde de dos partes; primero se hizo la parte hembra y luego la parte macho (anexo A-3), los cuales se elaboraron de la siguiente manera:

El machote se colocó sobre una base de Bentonita plástica con la cual se formó una plana a la altura de la mitad de este, procurando que no existan espacios entre el machote y la Bentonita; luego se preparó la caja para proceder al vaciado del yeso. Pasado 5 minutos (tiempo fraguado del yeso) se retiró el machote del molde, la cual se le hizo unos muescas que constituyeron las llaves del molde, para el caso, este primer molde es el hembra. A este molde hembra se le colocó nuevamente el machote y sobre esta base se elaboró el molde macho, el cual se utilizó con su respectivo molde hembra (anexo A-4).

Los moldes se secaron al sol durante tres días para poder ser utilizados pudiéndose secar estos en hornos de resistencia eléctrica a baja temperatura (60°C) durante una hora. Cuando estuvo listo el molde original (hembra y macho) se procedió a elaborar el contramolde, el cual es un negativo del molde y su función es la de obtener copias idénticas del molde original utilizando la misma técnica.

3.3.3.3 Preparación de la barbotina

Para la preparación de la barbotina se acondicionó un recipiente en el cual se vertió agua, luego se le adicionó arcilla de loza en polvo previa mezcla con el porcentaje de aserrín a utilizarse, para agitar la mezcla se utilizó una hélice accionada por un motor eléctrico. Dado que el producto obtenido en esta fase es de naturaleza demasiado densa; se procedió a añadir Silicato de sodio (para uso en la industria cerámica), el cual desfloculó las partículas de arcilla volviendo la mezcla mas delgada y trabajable.

3.3.3.4 Moldeado de las cápsulas

Para el moldeado se utilizó la técnica del vaciado de barbotina. Los moldes deben estar listos con sus paredes interiores secas y limpias, luego se procedió a elaborar las cápsulas de la siguiente forma:

El molde se unió con bandas de hule las cuales ejercían presión sobre este; luego fue sellado uno de los orificios del molde con arcilla de Bentonita y se procedió a verter la barbotina al molde por el segundo orificio hasta alcanzar su llenado y el espesor deseado de las paredes de la cápsula, lo cual fue alcanzado en un tiempo no mayor de 5 minutos, luego es quitado el sellado con

Bentonita de los orificios y vaciado el molde, el cual es dejado en reposo durante 30 minutos (El tiempo de reposo del molde puede aumentar dependiendo del contenido de saturación de humedad, lo que depende de cuanto se utilice); terminado el reposo se retira la cápsula aun humedad del molde dando ciertos golpes a este con la mano a puño cerrado, de tal forma de no llegar a romper la cápsula, seguidamente se retiran los hules y se levanta una de las partes del molde, y con precaución se sujeta la cápsula y se retira la otra parte del molde (anexo A-5). Retirada la cápsula se quitan con navaja las porciones salientes formadas por la unión de los moldes.

3.3.3.5 Secado de las cápsulas

La cápsula se sometió a un proceso de pre-secado en condiciones de sombra, poca ventilación y a temperatura ambiente por un día, para evitar contracciones bruscas y posteriores fracturas. Luego se hizo un secado al sol por dos días, con lo que se evaporara la mayor cantidad posible de agua contenida en ellas. Secadas las cápsulas fueron pulidas con lija con el objetivo de retirar la arcilla mas fina y dejar al descubierto los poros que forman estructura de la cápsula.

3.3.3.6 Vidriado

Esta técnica consiste en dar un pequeño baño de gley a las protuberancias laterales de la cápsula para que al momento de la quema este material actúe como fúndente y propicie la vitrificación de estas partes (anexo A-6).

El vidriado proporciona una mayor resistencia estructural a las protuberancias laterales de las cápsulas, además vuelve impermeable la estas partes y facilita la labor de conexión con tubos

plásticos. En el caso de este ensayo se ha utilizado el método de cochura en un solo paso o sea una sola cochura, pues se utilizó una temperatura menor a la de bizcocho para que esto fuese posible.

3.3.3.7 Cocción de las cápsulas

Para la cocción o "quema" de las cápsulas se utilizó un horno de gas propano, el cual se llevó a una temperatura de 850°C en un tiempo de calentamiento de 4 horas y un tiempo de enfriamiento del horno de 12 horas. El control de la temperatura se lleva a cabo mediante dos dispositivos: el pirómetro y los conos pirométricos (en este caso se uso el 06). Con el pirómetro se realiza una lectura directa de la temperatura en el horno, en cambio el cono pirométrico señala solo una temperatura específica.

3.3.3.8 Formación de porosidad

Para el caso del presente ensayo, se utilizó una combinación de dos métodos: la no vitrificación y la inclusión de material volátil.

Se adicionó a la mezcla cantidades variables de aserrín el cual fue eliminado (calcinado) durante el proceso de quema de las cápsulas, dado que los compuestos orgánicos comienzan a descomponerse unos 400 °C, con producción de CO₂, CO, H₂O, etc., dejando carbono libre en la pasta. En este proceso una vez que se ha expulsado todo el vapor de agua, el oxígeno puede penetrar los poros, iniciando la combustión del carbono.

En cuanto al mecanismo de cocción la temperatura de maduración normal de quema de la loza, oscila entre 940 a 1300 °C, pero en esta ocasión se realizó con un cono pirométrico 06, el cual da una temperatura de quema de 850 °C, permitiendo así la formación de una mayor porosidad.

3.4 Metodología de evaluación

3.4.1 Geometría de la cápsula

Se determinó tanto el volumen teórico, como el real (usando una probeta graduada); además se calculó el área de la superficie interna como externa de las cápsulas por medio del uso de fórmulas teóricas. Las dimensiones fueron determinadas en última instancia por los procesos de secado y cocción de las mezclas. Algunas fórmulas utilizadas en esta fase fueron desarrolladas por el equipo investigador y se encuentran detalladas en el anexo A-7.

3.4.1.1 Cálculo del volumen del ovoide

El volumen se calculó utilizando las siguientes fórmulas:

$$V = V_{\text{oi}} + V_{\text{esf}} \quad (3.1)$$

donde:

V = Volumen del ovoide (cm³)

V_{oi} = Volumen del semielipsoide (cm³)

V_{esf} = Volumen de la semiesfera (cm³)

Volumen del semielipsoide:

$$V_{\text{oi}} = (2 \cdot \pi \cdot a^2 \cdot b) / 3 \quad (3.2)$$

donde:

$a = 0.5$ del diámetro mayor de la cápsula o grosor, es el radio de la semiesfera (cm)

$b =$ altura del semielipsoide (anexo A-8) (cm)

Volumen de la semiesfera:

$$V_{esf} = (2 \cdot \pi \cdot a^3) / 3 \quad (3.3)$$

3.4.1.2 Cálculo de la superficie del ovoide

Para el cálculo de las superficie se tomaron las medidas de cada una de las cápsulas (altura, grosor y espesor de la pared) usando un pie de rey y luego se calculó con la formula:

$$S = S_{ell} + S_{esf} \quad (3.4)$$

donde:

$S =$ Superficie del ovoide (cm²)

$S_{ell} =$ Superficie del semielipsoide (cm²)

$S_{esf} =$ Superficie de la semiesfera (cm²)

Superficie del semielipsoide.

$$S_{ell} = (\pi^2 \cdot a^2 \cdot c^2) / 2 \cdot k - (\pi \cdot a^2 \cdot (c^2 \cdot \text{ATAN}(1/k) - k)) / k \quad (\text{cm}^2) \quad (3.5)$$

tomando en cuenta que:

$$c = a/b \quad (3.6)$$

$$k = \sqrt{(c^2-1)} \quad (3.7)$$

$$b = h - a \quad (3.8)$$

donde:

a = 0.5 del diámetro mayor de la cápsula o grosor, es el radio de la semiesfera

b = altura del semielipsiode (cm)

h = altura de la cápsula (cm)

ATAN = Función arcotangente (radianes)

Superficie de la semiesfera.

$$S_{esf} = 2 \cdot \pi \cdot a^2 \quad (\text{cm}^2) \quad (3.9)$$

Para el cálculo de la superficie interna de la cápsula se restó el valor del espesor de las paredes a los valores de altura y grosor, sustituyendo los valores en las mismas fórmulas.

Se determinaron las dimensiones de las cápsulas tanto externas como internas. Las externas fueron determinadas de acuerdo a tres medidas principales, tomando en cuenta el diseño del ovoide, en cambio para las medidas internas se utilizó el valor del espesor de la pared el cual se le restó a las medidas externas, esto debido a la dificultad de cortar las cápsulas de tal manera que no

se rompieran y quedasen intactas sus dimensiones, por lo que se cortaron partes con sierra y partes se rompieron impactándolas. Estas mediciones se realizaron con un pie de rey, con una aproximación de 0.05 mm.

3.4.2 Determinación de las liberaciones de agua

Las cápsulas fueron entubadas y selladas herméticamente, luego se colocaron dentro de un recipiente con agua durante un día antes de efectuar la prueba, procurando así, que éstas se encontraran completamente saturadas. Las cápsulas se instalaron en el permeámetro de nivel constante (anexo A-9), luego se sometieron a diferentes presiones hidrostáticas las cuales fueron: 0.25 m, 0.50 m, 0.75 m y 1.0 m; durante el lapso de 6 horas, computando los volúmenes de agua recolectados y medidos con una probeta graduada de 1000 cc en función del tiempo y en seguida, se estimó la liberación diaria de agua (caudal total de la cápsula) multiplicando el caudal colectado por 24 horas que tiene el día (anexo A-10).

Se realizó un promedio de 8 mediciones de la cantidad de agua liberada por las cápsulas en periodos de 30 a 45 minutos, dependiendo de la velocidad del flujo en cada una, para lo cual se empleó un recipiente colector por cápsula y una probeta de 1000 cc para medir lo volúmenes de agua para una hora determinada. Utilizandose estos posteriormente para los cálculos de caudal específico y permeabilidad de las cápsulas.

3.4.2.1 Determinación del caudal específico

El caudal específico se determinó en base a la ecuación utilizada por Valle (1977) la cual es como sigue:

$$QE = Qm / Sp \quad (3.10)$$

donde:

$$QE = \text{Caudal específico} \quad (\text{lt/día/cm}^2)$$

$$Qm = \text{Caudal máximo por día} \quad (\text{lt/día})$$

$$Sp = \text{Superficie promedio de la cápsula} \quad (\text{cm}^2)$$

La superficie promedio de la cápsula se obtuvo de sumar tanto la superficie interna como la externa y luego sacar el promedio:

$$Sp = (S_1 + S_2) / 2 \quad (3.11)$$

donde:

$$S_1 = \text{Superficie interna de la cápsula} \quad (\text{cm}^2)$$

$$S_2 = \text{Superficie externa de la cápsula} \quad (\text{cm}^2)$$

3.4.2.2 Determinación de la conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica del material de las cápsulas, determinó con el mismo equipo de medición de caudal, funcionando de esta manera como un permeámetro de nivel constante, los valores fueron obtenidos utilizando la ley de Darcy, la cual ha sido modificada por Silva et al. para realizar este tipo de estudio:

$$k = V / t . (S_1 + S_2) / 2 . (\Delta H / E) \quad (3.12)$$

al simplificarla se obtiene:

$$k = (2 \cdot E \cdot V) / (t (S_1 + S_2) \cdot \Delta H) \quad (3.13)$$

donde:

k : Conductividad hidráulica	(cm/hora)
V : Volumen colectado	(cm ³)
t : Tiempo	(horas)
S₁ : Superficie externa de la cápsula	(cm ²)
S₂ : Superficie interna de la cápsula	(cm ²)
ΔH : Alturas de carga hidráulica	(cm)
E : Espesor de las paredes de la cápsula	(cm)

3.4.3 Determinación de las constantes físicas de las cápsulas

En este apartado se describirán algunas metodologías que fueron aplicadas para el conocimiento de las propiedades físicas de las cápsulas.

3.4.3.1 Determinación de la densidad

La densidad de las cápsulas se determinó tomando los tres parámetros propuestos por Singer y Singer (22) para materiales cerámicos, estos son los siguientes:

3.4.3.1.1 Densidad verdadera (dv)

La densidad verdadera se denomina también densidad real o densidad del polvo o densidad absoluta, y se obtiene de muestras exentas de vidriado, las cuales mediante trituración o abrasión se convierten en polvo, al cual se le determina la densidad con el método del picnómetro.

$$dv = pps / vkd \quad (3.14)$$

donde:

dv = densidad real del polvo (gr/cc)

pps = peso del polvo seco (gr)

vk d = volumen de partículas (cc)

3.4.3.1.2 Densidad a granel

Se entiende como la relación de la masa de un material a su volumen a granel, es decir el volumen del material mas todos sus poros cerrados y abiertos. Se conoce también como densidad aparente. Tanto la densidad a granel como la densidad aparente se obtuvieron a partir del mismo procedimiento de ensayo.

Se tomo una muestra de la cápsula, en forma de cuadro, y se puso a estufa durante 24 horas a 105°C luego se colocaron en un desecador durante 1 hora y seguidamente se peso obteniéndose el peso de la pieza de ensayo seca (W_A), posteriormente se colocaron en un beaker de 500 cc con agua destilada y se llevo a ebullición durante 1 hora, luego se dejó en reposo durante 23 horas, la muestra saturada en agua se peso obteniéndose el peso de la pieza de ensayo empapada y

suspendida en aire (W_c), inmediatamente la misma es sumergida en Kerosene, y en suspensión se tomo su peso (W_b), con este último se obtuvo su peso incluyendo el volumen total de poros.

$$dg = (W_A / (W_C - W_b)) \times dk \quad (3.15)$$

$$vg = (W_C - W_b) / dk \quad (3.16)$$

donde:

dg : densidad a granel

vg : volumen a granel

W_A : Peso de la pieza de ensayo seca

W_b : Peso de la pieza de ensayo empapada y suspendida en el liquido de inmersión

W_C : Peso de la pieza de ensayo empapada y suspendida en el aire

dk : Densidad del kerosene (0.79 g/cm^3)

3.4.3.1.3 Densidad aparente de sólidos

Esta es la relación de la masa de un material y su volumen sólido aparente, es decir el volumen del material más el volumen de poros encerrados.

$$das = (W_A / (W_A - W_b)) \times dk \quad (3.17)$$

$$vas = (W_A - W_b) / dk \quad (3.18)$$

donde:

das = Densidad aparente de sólidos

vas = Volumen aparente de sólidos

W_A = Peso de la pieza de ensayo seca

W_b = Peso de la pieza de ensayo empapada y suspendida en el kerosene (líquido de inmersión)

dk:= Densidad del kerosene (0.79 gr/cc).

3.4.3.2 Determinación de la porosidad

De acuerdo a lo anterior para determinar la porosidad en materiales cerámicos Singer y Singer proponen el uso de tres parámetros: porosidad aparente, porosidad verdadera y porosidad cerrada.

3.4.3.2.1 Porosidad aparente (pa)

Es la relación del volumen de los poros abiertos al volumen a granel de un material.

$$pa = 100 \times (1 - (dg / das)) \quad (3.19)$$

3.4.3.2.2 Porosidad verdadera (pv)

Es la relación de volumen de los poros abiertos y los cerrados al volumen a granel.

$$pv = 100 \times (1 - (dg / dv)) \quad (3.20)$$

3.4.3.2.3 Porosidad cerrada (pc)

Es la relación del volumen de los poros cerrados al volumen a granel, también llamada porosidad sellada.

$$pc = 100 \times dg \times ((1 / das) - (1 / dv)) \quad (3.21)$$

3.4.4 Determinación del modelo matemático para las curvas caudal-carga

De acuerdo con el comportamiento de las variables en estudio y después de probar con varios modelos matemáticos se eligió un modelo de predicción de acuerdo al valor del coeficiente de correlación (r^2) para representar la serie de curvas caudal-carga correspondientes a las diferentes proporciones de mezclas de materiales utilizados en la elaboración de las cápsulas.

$$y = a + bx \quad (3.22)$$

donde:

y : Valor de caudal esperado (l/día)

x: Valor de la carga hidráulica (m)

a y b : Coeficientes de regresión

3.4.5 Evaluación del bulbo de humedecimiento

Esta se llevó a cabo utilizando las cápsulas con proporción de mezcla de 100:0 y tres texturas diferentes de suelo, a nivel de invernadero (anexo A-11).

3.4.5.1 Construcción de cajas

Se construyeron 6 cajas con marcos de madera selladas con fibrolit y un lado de éstas con vidrio de 4 ml de espesor. Las cajas poseían las siguientes dimensiones:

- 2 cajas de 0.80 x 0.60 x 0.60 m donde se ensayó con el suelo de textura franco arcillo limoso.
- 4 cajas de 0.60 x 0.80 x 0.50 m donde se ensayó con los suelos de textura franco limoso y franco arenoso.

La función de éstas era mantener un cubo de suelo que simulara un perfil.

3.4.5.2 Conexión del sistema

Se cortaron las cápsulas en forma longitudinal entre las dos protuberancias y fueron pegadas al vidrio con pegamento epóxico a una profundidad de 10 cm de donde estaría la superficie del suelo, posteriormente se entubaron con poliducto de ½ pulgada de diámetro uniendo éste con pegamento de vinilo a las protuberancias y conectándolo a la vez a los recipientes contenedores (5 gln); este modelo de sistema permitió ver a través del vidrio, el comportamiento de las burbujas de aire al interior que se forman en el interior de las cápsulas (anexo A-12) y al mismo tiempo, la formación del bulbo húmedo desde su inicio hasta el final. El esquema del sistema de conexión se puede observar en el anexo A-13.

3.4.5.3 Preparación del suelo

Los pasos seguidos para en esta parte del ensayo fueron los siguientes:

- a) Se identificó las diferentes texturas, en diferentes puntos del mapa de clasificación de suelos del Campo Experimental y de Prácticas de la Facultad (anexo A-14).
- b) Se verificó la textura al tacto.
- c) Se verificó la textura en el laboratorio por el método de Bouyoucos.
- d) Se recolectó 1.90 m^3 de suelo para el llenado de las cajas, distribuido de la siguiente forma:
 - Franco arenoso 0.60 m^3
 - Franco limoso 0.60 m^3
 - Franco arcillo limoso 0.70 m^3
- e) Secado del suelo al aire libre durante 2 meses, con el fin de eliminar la humedad, ya que éste fue obtenido durante la época lluviosa.
- f) Tamizado del suelo con una zaranda de 0.5 cm de luz, con el objetivo de retirar raíces y piedras, y uniformizarlo.

3.4.5.4 Llenado de las cajas

Las cajas se llenaron en capas de 15 cm, hasta completar su altura, compactando y chequeando la penetración de 0.4 kg/cm^2 con la ayuda de un penetrómetro de pistón.

3.4.5.5 Determinación del comportamiento del bulbo

Para esta prueba se utilizó una presión hidrostática estándar de 0.37 m, con la cual se obtendría un caudal de 5 lts/día para todas las cápsulas utilizadas en los 3 tipos de texturas ya mencionados. La carga fue determinada haciendo uso del modelo de predicción obtenido de los datos de liberaciones de agua en medio acuoso, para la mezcla de 100:0, con la cual se trabajó (cuadro N° 5). Las tres texturas se comenzaron a evaluar a la misma hora no existiendo un tiempo determinado para la medición del bulbo húmedo, así como del gasto de agua, ya que este fue determinado por el mismo comportamiento de cada textura de suelo.

La presión hidrostática se mantuvo 0.01 m arriba y/o debajo de la carga nominal, durante todo el ensayo, lo cual se dio como efecto de las adiciones periódicas de agua al sistema.

3.4.5.5.1 Contenido de humedad inicial

Al momento de efectuar las pruebas se procedió a tomar una muestra de suelo por caja y determinar así el contenido de humedad inicial por el método gravimétrico.

$$\theta_w = (W_w - W_o) / W_o = (W_w / W_o) - 1 \quad (3.23)$$

$$P_w = 100 \theta_w \quad (3.24)$$

donde:

θ_w = contenido de humedad con base en el peso seco.

W_w = peso del suelo húmedo.

W_o = peso de suelo seco.

P_w = porcentaje de humedad con base en el peso seco del suelo.

3.4.5.5.2 Gravedad específica aparente (GEA)

Se determinó por el método del cilindros de volumen conocido, en la cual se utilizó la siguiente fórmula:

$$\delta_a = P_{ss} / V_{as} \quad (3.25)$$

donde:

δ_a = densidad aparente del suelo (grs / cc)

P_{ss} = peso de suelo seco (grs)

V_{as} = volumen aparente de suelo (cc)

El valor de la densidad aparente de suelo se ingresa a la siguiente fórmula para obtener GEA:

$$GEA = \delta_a / \delta_{H_2O} \quad (3.26)$$

donde:

δ_a = densidad aparente del suelo (grs / cc)

δ_{H_2O} = densidad del agua (1 gr / cc)

GEA = gravedad específica aparente (adimensional)

3.4.5.5.3 Gravedad específica real (GER)

Esta se determinó por el método del picnómetro, utilizando la siguiente fórmula:

$$\delta_r = P_{ss} / V_{ps} \quad (3.27)$$

donde:

δ_r = densidad real del suelo (grs / cc)

P_{ss} = peso de suelo seco (grs)

V_{ps} = volumen de partículas de suelo (c)

El valor de la densidad real del suelo se ingresa a la siguiente fórmula para obtener GER.

$$GER = \delta_r / \delta_{H_2O} \quad (3.28)$$

donde:

δ_r = densidad real del suelo (grs / cc)

δ_{H_2O} = densidad del agua (1 gr / cc)

GER = gravedad específica aparente (adimensional)

3.4.5.5.4 Porosidad del suelo

Esta propiedad física del suelo fue determinada una vez calculados los valores de GEA y GER, para lo cual se utilizó la siguiente fórmula:

$$\%n = (1 - GEA / GER) \times 100 \quad (3.29)$$

donde:

$\%n$ = porcentaje total de poros

GEA = gravedad específica aparente

GER = gravedad específica real

3.4.5.5.5 Gasto de agua y medidas del diámetro en el bulbo de humedecimiento

Para la obtención de datos precisos en gasto de agua se realizaron mediciones del nivel del agua, con un escalímetro y un gancho metálico (tipo anzuelo) realizándose una lectura cuando el nivel del agua disminuía o bajaba 0.01 m y una segunda lectura al agregar un volumen que mantuviese la carga hidrostática (0.37 m).

Para realizar la toma de datos del diámetro del bulbo húmedo se llevó un registro en el cual se detallaba la hora en que se realizaban las lecturas del avance del bulbo húmedo; las lecturas realizadas no obedecían a una hora específica debido al diferente comportamiento de los bulbos en las texturas de suelo.

3.4.5.5.6 Contenido de humedad a diferentes tensiones

Se colectaron cuatro muestras por cada textura las cuales fueron sometidas a las ollas de presión y platos cerámicos de Richards, para las tres texturas en estudio, luego se utilizó el método gravimétrico para determinar el contenido de humedad de cada muestra utilizando la fórmula 3.23 y 3.24.

3.4.5.5.7 Curvas de retención de humedad

Las curvas de retención de humedad se generaron a partir de los datos obtenidos en las ollas de presión y platos de cerámica, con cuatro presiones diferentes (0.33, 2.0, 8.5 y 15 atm) para las texturas de suelo en estudio.

3.4.5.5.8 Contenido de humedad del bulbo

El contenido de humedad del bulbo se determinó en varios puntos de éste, siguiendo líneas desde la pared de la cápsula hasta el extremo del bulbo (radio de mojado) tomando muestras de suelo cada 5 cm y midiendo la distancia de éstas a la cápsula; las muestras así obtenidas se colocaron en cajas de aluminio y se determinó su contenido de humedad gravimétrica

3.4.6 Determinación del modelo matemático para la difusión del bulbo de humedecimiento.

Con el objeto de generar datos con fines de diseño se obtuvo el modelo matemático para predecir la difusión del bulbo de humedecimiento en función del tiempo. Para elegir el modelo se

hizo uso de varios tipos de modelos matemáticos entre ellos los de regresión simple y a la vez partiendo de antecedentes de investigaciones anteriores se probó con los de regresión múltiple, seleccionando aquella con mayor coeficiente de correlación (r^2).

De acuerdo al comportamiento de las variables el modelo de predicción fue el siguiente:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_1^2 \quad (3.30)$$

donde:

y : Valor predicho del diámetro humedecido (cm)

x_1 : $\log x$

x : Valor del tiempo (hr)

$a_0, a_1, y a_2$: Coeficientes de regresión

Para realizar la toma de datos del diámetro de humedecimiento se llevó un registro en el cual se detallaba la hora a la cual se realizaba la lectura y la medida del bulbo. Las medidas se realizaron de acuerdo al comportamiento de cada uno de los bulbos debido principalmente al avance de éste, las lecturas así realizadas obedecía a una hora específica.

3.4.7 Determinación del modelo matemático para el contenido de humedad del bulbo.

Para determinar este modelo se siguió el mismo criterio que con el anterior, de esta forma se llegó al siguiente modelo de predicción :

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_1^2 \quad (3.31)$$

donde:

y = Valor predicho de contenido de humedad (%)

x_1 = Valor del tiempo (hr)

a_0, a_1 y a_2 = Coeficientes de regresión

La metodología para determinar el contenido de humedad en el bulbo se detalló anteriormente en el numeral 3.4.5.5.8, todo ello con el fin de generar curvas de contenido de humedad vs distancia.

3.5 Determinación de costos de producción

Para la determinación de costos de producción se llevaron a cabo mediciones de peso y volumen de los materiales utilizados en la construcción de las cápsulas; considerando otros como mano de obra, local, transporte, servicios depreciación de equipo y moldes.

3.5.1 Requerimientos de materia prima

Para la elaboración de las cápsulas se necesita como principal y único componente la arcilla de loza. Determinándose la cantidad de arcilla necesaria para una cápsula, durante el proceso de construcción.

3.5.2 Requerimientos de otros materiales

3.5.2.1 Yeso

Para la construcción de las cápsulas de arcilla, es necesaria la utilización de moldes de yeso, ya que el método de construcción es el de colada de barbotina en moldes de yeso, de ahí la utilización de éste para la elaboración de los moldes; durante el proceso de la elaboración de éstos, se tomaron en consideración las recomendaciones de Singer y Singer, que para moldes de colada se deben utilizar 90 partes en peso de agua, para 100 partes de peso en yeso.

3.5.2.2 Silicato de sodio

Otro de los materiales utilizados para la elaboración de cápsulas, el cual es requerido en pequeñas proporciones para la preparación de la barbotina.

3.5.3 Costos de proceso

En esta parte se determinaron algunos costos que son inherentes a la elaboración de las cápsulas, tales como mano de obra, aplicación de vidriado, cocción, transporte de materiales y otros.

4. RESULTADOS

4.1 El diseño de la cápsula

En esta parte se presentan los resultados obtenidos en los ensayos preliminares, de acuerdo a los aspectos considerados como lo son la forma de la cápsula y las dimensiones de ésta.

4.1.1. Ensayos de la forma de la cápsula

Establecidas las consideraciones sobre el diseño de las cápsulas, se procedió a probar tres formas regulares ya conocidas y una en forma analítica (esfera), las cuales fueron desarrolladas utilizando diferentes métodos de construcción (torno de alfarero, repujado en molde de yeso y vaciado de barbotina en moldes de yeso) y materiales; dentro de las formas estudiadas tenemos: cono truncado, cilindro, esfera y ovoide (figura N° 1).

4.1.1.1. Cono truncado

A pesar de que se pudo realizar varias muestras con ésta forma, su confección fue un tanto complicada, dado que se trataba de elaborar una estructura completamente cerrada, a la cual posteriormente se le agregaban las protuberancias para la entrada y salida del agua. Uno de los inconvenientes más difíciles de superar en esta etapa era la presencia de "ombigos" en las cápsulas, o sea puntos de debilidad y faya ubicados en las zonas donde se cierra la cápsula cuando

se finaliza su elaboración en el torno, que es exactamente en el centro de la parte superior de ésta; el problema no fue superado, puesto que técnicamente era inevitable y escapaba a la pericia del alfarero. Otro inconveniente fue la falta de uniformidad de la pared de la cápsula, dentro de una misma cápsula, como entre las diferentes cápsulas, dado que con el método del torno era muy difícil lograr una uniformidad aceptable, incluso en sus dimensiones.

La forma de cono truncado no se probó con otros métodos ni con otros materiales, debido a que en esta etapa del estudio, no se dominaban otras técnicas de trabajo en cerámica por lo que se daba énfasis al uso de materiales locales, los cuales no pueden ser trabajados con métodos más depurados.

4.1.1.2. Cilindro

Construido con el método de repujado en molde de yeso y utilizando el mismo cuerpo cerámico que se usó con la forma anterior, se logró obtener varias muestras de buena apariencia y uniformidad, las cuales presentaban los inconvenientes de que algunas tendían a agrietarse de la parte de los extremos planos de la cápsula (superior e inferior), debido a que cuando el cuerpo cerámico se iba secando, en este se producían fuerzas de tensión que se concentraban al centro de los círculos, provocando la falla de la zona de unión de las dos piezas originales. Otro inconveniente era, que las paredes de la cápsula presentaban desuniformidad, especialmente en los ángulos que formaban las esquinas del cilindro y en las inserciones de las protuberancias. En general la forma de cilindro presentaba dificultad en el desmolde, y en sus caras planas, al igual que en la forma anterior, se producía el fenómeno del debilitamiento del centro por la acción de las fuerzas radiales que se producían como un efecto de la merma en el secado del material.

4.1.1.3. Esfera

Debido a la dificultad que se presentaba en la anterior prueba, en cuanto a desmoldar las cápsulas, se pensó en una forma que presentase un mínimo de esquinas o ángulos agudos, los cuales son la causa de dicha dificultad, dado que se produce una mayor adhesión en la interfás yeso-cerámica. De esta manera se propuso la esfera, ya que por su forma ayudaría a disminuir el efecto de retención en el desmoldado debido a que posee una menor superficie de contacto y mayor uniformidad, además de distribuir las fuerzas producidas por la merma en el secado del material y de esta forma evitar fallas o "cuarteado" del material. La forma esférica no se ensayó debido a que con anticipación se previó que no se podía llevar a cabo la adecuada ubicación de las protuberancias tubulares, las cuales servirán como unión con los tubos interconectores, dado que éstas resultarían en estructuras complicadas que desecharían las anteriores ventajas, pues de otra manera se presentarían espacios con aire demasiado grandes al interior de la cápsula.

4.1.1.4. Ovoide

Tomando como base la forma esférica y debido a las ventajas que ésta presentaba, se derivó una forma tal que superara la dificultad de la esfera. Se propuso entonces un ovoide (forma de huevo), el cual estaría formado en su parte inferior por una semiesfera y en su parte superior por un semielipsoide (anexo A-8).

Este ovoide al igual que la esfera, permitiría una distribución de las fuerzas de tensión, y también al igual que el cono truncado, se podía ubicar de manera adecuada las protuberancias tubulares para la interconexión de las cápsulas; además en la evaluación realizada presentó un

mínimo de dificultad para desmoldar las cápsulas y su forma contribuyó a una mejor resistencia estructural.

El inconveniente que presentó esta forma fue en cuanto a su geometría, la cual por ser una composición de otras formas, no se encontró referencias que mostraran sus ecuaciones de volumen y superficie (en especial la parte del elipsoide), por lo que se tuvo que hacer uso de métodos matemáticos para su definición (anexo A-7), pues dichas ecuaciones son necesarias para la evaluación de las cápsulas y su desarrollo. Este inconveniente no se presentaba con las demás formas regulares.

4.1.2. Dimensiones de la cápsula

De acuerdo a las tres formas de cápsulas que fueron construidas en el proceso de investigación, se presentan a continuación las dimensiones promedio de éstas:

Cuadro N° 1. Dimensiones de las cápsulas elaboradas con diferentes formas geométricas y su volumen.

Características	Altura (cms)	Espesor de pared (cms)	Diámetro mayor externo (cms)	Diámetro menor externo (cms)	Volumen (cc)
Forma					
Cono truncado	13.64	0.581	12.58	8.81	843.33
Cilindro	7.37	0.395	5.72	-	122.50
Ovoide	13.18	0.397	9.97	-	594.68

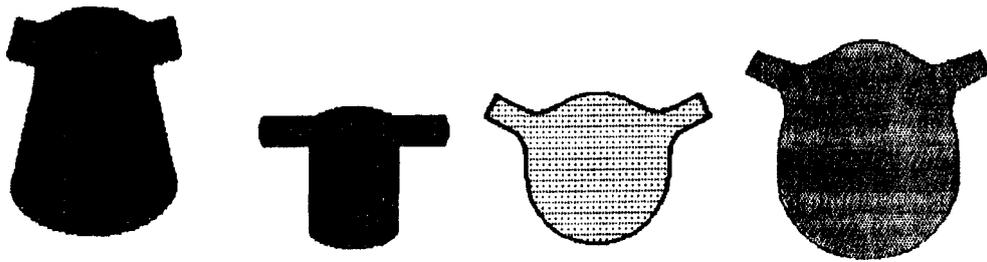


Figura N° 1. Diferentes formas geométricas ensayadas. De izquierda a derecha: cono truncado, cilindro, esfera y ovoide.

4.2 Construcción de las cápsulas

4.2.1 Métodos de construcción

Para la construcción de las cápsulas se utilizaron diferentes métodos, los cuales iban variando de acuerdo al tipo de material utilizado y a las exigencias del caso, tomando como base la experiencia acumulada. Dentro de los métodos desarrollados tenemos: torno de alfarero, repujado en molde de yeso y colado con barbotina.

4.2.1.1. Torno de alfarero

Este método presentó sus mayores limitantes en cuanto a la desuniformidad de las cápsulas terminadas y a la presencia de "ombligos" o puntos de cierre que constitulan puntos de faya de la estructura.

4.2.1.2. Repujado en molde de yeso

Debido a la falla del método de torno se procedió a elaborar las piezas con el método de repujado en molde. El material utilizado fue siempre la mezcla de arcilla de Ilobasco con ceniza volcánica.

Dentro del estudio, este método presentó su mayor limitante en cuanto a la resistencia estructural de las cápsulas, las cuales mostraban fisuras en las zonas de unión de las partes del molde y cuando éstas no eran notorias a simple vista, salían a relucir en el momento de la prueba hidráulica, en la cual se presentaban fugas de agua y en casos extremos las cápsulas se partían por la mitad.

Con este método se pueden lograr cápsulas de buena apariencia externa dependiendo de la calidad del molde, pero difícilmente se podrá obtener una calidad de la superficie interna pues ésta depende de la habilidad del ceramista, dando como resultado un grosor irregular de las paredes de las cápsulas y por lo tanto una marcada desuniformidad entre las diferentes cápsulas.

4.2.1.3. Colado con barbotina en molde de yeso

Este método de colado con barbotina presenta el inconveniente de que no puede utilizarse cualquier cuerpo cerámico para la elaboración de objetos, esto debido a que la barbotina debe presentar ciertas características de colada que posibiliten su manipulación adecuada; dentro de estas se pueden mencionar la no sedimentación, bajo contenido de agua y facilidad de desfloculación. Por las anteriores limitantes, este método no puede ser utilizado con materiales del

tipo terracota, sino solamente con aquellos con alto contenido de arcillas del tipo caolín como lo son la loza y la porcelana.

Dadas las limitantes que impone el método se optó por la arcilla de loza, la cual es muy utilizada a nivel artesanal en el país; se trabajó con diferentes combinaciones de materiales o cuerpos cerámicos, haciendo uso de ensayos de prueba-error; al final, el método demostró sus bondades al obtener cápsulas de una sola pieza con una muy buena uniformidad y de una resistencia estructural aceptable; además las cápsulas rara vez mostraban cuarteamiento y no presentaron problemas de falla en las pruebas hidráulicas.

4.2.2. Comportamiento de los materiales de construcción

Los materiales de construcción utilizados en el estudio fueron variados, éstos junto con los aditivos conformaban los diferentes cuerpos cerámicos, aunque el principal componente de un cuerpo cerámico lo constituye el o los tipos de arcilla que se estén utilizando para su conformación. Para el estudio se utilizaron solo dos tipos de arcilla: barro de Ilobasco y arcilla de loza comercial.

4.2.2.1. Arcilla de Ilobasco

Este material fue ensayado inicialmente, pero debido a su naturaleza no se pudo utilizar con el método de colada, pues éste material no se puede desflocular para formar una buena barbotina. Con el método de torno y repujado en molde si presentó una buena condición de trabajo. Otro aspecto notorio que mostró el barro de Ilobasco fue la presencia de carbón al interior de las

paredes de las piezas quemadas, e incluso en la parte interna de las cápsulas, lo cual no contribuye a la formación de una buena porosidad.

4.2.2.2. Arcilla de loza

La arcilla de loza solamente se utilizó con el método de colada, con el cual da un buen resultado, tanto en la facilidad de trabajo como en la calidad de las piezas. Con respecto a la quema, el material no presentaba restos de carbón ni manchas que dieran indicios de la presencia de otros materiales extraños, por lo cual se puede decir que presentaba un buen comportamiento en la quema. Este material además es más fuerte que la arcilla de Ilobasco, ya quemado.

4.2.3 Comportamiento de los aditivos

En este apartado se describe de manera breve el comportamiento observado por los diferentes aditivos utilizados en el ensayo.

4.2.3.1 Arena

El primer aditivo utilizado con el objeto de formar porosidad fue la arena, la cual se utilizó junto con la mezcla de arcilla de Ilobasco y ceniza volcánica. Con éste aditivo se obtuvo un buen resultado en las pruebas preliminares, permitiendo un aumento de la infiltración del agua en las cápsulas, en relación al aumento del contenido de arena en la mezcla; el inconveniente que presentó fue el debilitamiento de la cápsula al aumentar su contenido.

La arena no fue utilizada con la arcilla de loza dado que ésta tendería a sedimentarse ocasionando problemas en la colada de la pieza.

4.2.3.2 Carbón de madera

Se utilizó con la mezcla de suelo arcilloso (arcilla de Ilobasco) y ceniza volcánica para dar una porosidad más uniforme a la pieza, obteniendo como resultado que éste presentaba problemas en cuanto a su humectación por lo que además dificultaba la operación de mezcla de los materiales, requiriendo de un mayor esfuerzo para lograr una buena homogeneidad de las piezas. Otro inconveniente de éste aditivo es que no se lograba quemar por completo, cuando se utilizaba en proporciones altas, quedando gran parte de éste adherido a la superficie interna de las cápsulas y en la parte media de las paredes, donde se notaba como una región oscura bien definida.

4.2.3.3 Harina de trigo

Fue utilizada solamente con la mezcla de suelo arcilloso (arcilla de Ilobasco) y tierra blanca. Este aditivo se utilizó con el fin de solventar el problema de humectación que se daba con el carbón, y efectivamente este problema quedó superado pues la harina si es fácilmente humectada y por lo tanto se facilitaba el proceso de mezcla de los materiales. El inconveniente que presentó éste material es que, al igual que el carbón se producían depósitos de carbón en las superficie interna y al interior de la pared, lo cual era notorio al quebrar las piezas. Otro inconveniente que presentó éste aditivo fue que a medida que iba aumentando la cantidad de harina en la mezcla se producía una disminución en el tamaño de las cápsulas después de quemadas.

4.2.3.4 Estiércol de bovino

El estiércol de bovino fue utilizado tanto con la mezcla de arcilla de Ilobasco y ceniza volcánica, como con la barbotina de arcilla de loza.

Cuando el estiércol de bovino fue utilizado junto con la arcilla de Ilobasco y ceniza volcánica se obtuvo buenos resultados dado que el producto obtenido se podía mezclar y trabajar fácilmente, y después de la quema las piezas presentaban una buena uniformidad y no mostraban restos de carbón como los casos anteriores. Al utilizar éste aditivo con la barbotina de arcilla de loza se tuvo el problema de que el estiércol tendía a formar grumos, lo cual dificultaba la operación de colada, además no se podía desairar la mezcla en forma satisfactoria por lo que las cápsulas presentaban burbujas en sus paredes; el estiércol producía un efecto adherente de la mezcla con el molde de yeso lo que imposibilitaba el adecuado desmolde de las cápsulas.

4.2.3.5 Carbonato de calcio

Este aditivo fue utilizado solamente con la barbotina de arcilla de loza; la mezcla de éste material no se dificultó pero se tuvo problemas por la sedimentación de dicho aditivo, el cual no se podía mantener en suspensión, aun utilizando agitación continua. Esto provocó que las cápsulas construidas presentaran desuniformidades considerables en el espesor de sus paredes (anexo A-15). Posteriormente esta limitante fue superada mediante la rotación del molde en el período de colada.

El comportamiento de las cápsulas después de quemadas fue desalentador, dado que éstas perdían totalmente su estructura, desintegrándose por completo, debido a la reacción del óxido de calcio resultante de la calcinación del carbonato de calcio, con la humedad del medio ambiente.

4.3. Evaluación hidráulica.

La evaluación hidráulica se realizó con aquellas cápsulas que lograban superar las fases de diseño y construcción. En un inicio y a pesar de algunos inconvenientes como la desuniformidad y fallas estructurales, algunas cápsulas fueron sometidas a ensayos de liberación de agua para determinar el caudal que éstas podían liberar con la aplicación de las diferentes cargas hidrostática, logrando pasar esta prueba, solamente las cápsulas construidas con arcilla de loza.

De acuerdo a éstos resultados se optó por las cápsulas de arcilla de loza para realizar el trabajo de evaluación hidráulica.

4.3.1 *Análisis de las dimensiones y volumen de las cápsulas*

Se obtuvo la medida del volumen mediante la medición con probeta, para las diferentes cápsulas de acuerdo a la relación de mezcla utilizada. Por medio de la ecuación 3.1, se obtuvo el volumen teórico de las cápsulas, partiendo de las dimensiones de éstas. El volumen real era un poco mayor que el teórico generado, dado que las cápsulas realmente poseen un poco más de volumen que el supuesto, debido a las protuberancias (donde se conectan), lo cual no fue tomado en cuenta para generar el modelo.

Se procedió a realizar una regresión lineal con los valores teóricos y reales, encontrando que los datos poseían una alta correlación ($r^2 = 0.975$), la gráfica generada se puede observar en el anexo A-16. El modelo matemático de predicción obtenido es el siguiente:

$$y = 11.07363 + 1.066649 \cdot x \quad (4.1)$$

donde:

x es el valor teórico

y es el valor que se aproxima al valor real

por medio de este modelo se procedió a corregir los valores teóricos; los resultados se encuentran en el cuadro N°2.

Con los valores de las dimensiones de las cápsulas, se generó con ayuda de la ecuación 3.4, datos de la superficie teórica. Se tomó en cuenta que estos datos tendrían, al igual que los de volumen teórico, un margen de error que tenía que ser corregido; de esa forma, se realizó una correlación entre volumen y superficie (teóricos), el cual dio como resultado un modelo lineal, con una alta correlación, $r^2 = 0.999$, lo cual se puede observar en la gráfica del anexo A-17. El modelo generado fue el siguiente:

$$y = 109.2967 + 0.402557 \cdot x \quad (4.2)$$

donde:

y es el superficie teórica interna

x es el volumen teórico interno

partiendo de que el volumen teórico posee una alta correlación con su correspondiente volumen real, se ha supuesto que la superficie teórica también posee una alta correlación con su correspondiente superficie real (que no se puede medir con los medios existentes), por lo que además se asume que volumen y superficie real, poseen una correlación la cual es similar a la de sus correspondientes teóricos. Así, a partir de la ecuación 4.2, se han generado a partir de los datos de volumen corregido, valores de superficie corregida, bajo los supuestos señalados.

Como no se cuenta con valores de volumen real externo, se hace difícil poder derivar valores de superficie externa. De esta manera se utilizó un artificio más, correlacionando la superficie teórica interna, con la superficie corregida interna, con lo cual se obtuvo una alta correlación con un valor de $r^2 = 0.999$ (anexo A-18), para el cual se calculó el siguiente modelo de predicción:

$$y = -2.66538 + 1.066159 \cdot x \quad (4.3)$$

donde: y es la superficie corregida interna

x es la superficie teórica interna

a partir de la ecuación 4.3, y partiendo de los datos de superficie teórica externa (con la única que se contaba), se generó información de la superficie corregida externa de la cápsula, todo esto siempre bajo los supuestos ya señalados. Toda esta información generada es la base para el cálculo de las propiedades hidráulicas de las cápsulas porosas.

Cuadro N° 2. Datos sobre dimensiones de las cápsulas porosas ovoides y corrección del volumen teórico.

Mezcla	N°	Altura (cm)	Grosor de frente (cm)	Grosor de lado (cm)	Grosor prome dio (cm)	Espesor (cm)	a interno (cm)	b interno (cm)	a externo (cm)	b externo (cm)	Vo teó (
100:0	1	13.175	10.310	9.780	10.045	0.285	4.738	7.868	5.023	8.153	5
	2	13.335	10.055	9.865	9.960	0.345	4.635	8.010	4.980	8.355	5
	3	13.185	10.155	9.910	10.033	0.300	4.716	7.869	5.016	8.169	5
	4	13.125	10.075	9.695	9.885	0.325	4.618	7.858	4.943	8.183	5
90:10	1	13.290	10.085	9.955	10.020	0.328	4.682	7.952	5.010	8.280	5
	2	13.340	10.160	9.920	10.040	0.325	4.695	7.995	5.020	8.320	5
	3	13.105	10.215	9.795	10.005	0.345	4.658	7.758	5.003	8.103	5
	4	13.275	10.200	9.865	10.033	0.345	4.671	7.914	5.016	8.259	5
85:15	1	13.260	10.200	9.850	10.025	0.383	4.630	7.865	5.013	8.248	5
	2	13.215	10.005	9.810	9.908	0.385	4.569	7.876	4.954	8.261	5
	3	13.320	10.075	9.955	10.015	0.393	4.615	7.920	5.008	8.313	5
	4	13.185	10.155	9.745	9.950	0.385	4.590	7.825	4.975	8.210	5
80:20	1	13.075	9.850	9.915	9.883	0.570	4.371	7.564	4.941	8.134	4
	2	13.015	10.030	9.830	9.930	0.592	4.373	7.458	4.965	8.050	4
	3	12.970	9.890	9.760	9.825	0.535	4.378	7.523	4.913	8.058	4
	4	13.065	10.065	9.810	9.938	0.503	4.466	7.593	4.969	8.096	5

* De acuerdo a la ecuación 3.1

** De acuerdo a la ecuación 4.1

4.3.1.1 Aire en el interior de las cápsulas

Un aspecto bastante interesante fue el comportamiento de la burbuja de aire que se forma debido a la posición de las protuberancias (anexo A-12). Esta burbuja en algunas cápsulas desapareció en menos de 1 hora, mientras que en otras se mantuvo hasta por 5 días, pero en general la tendencia era a desaparecer poco a poco.

Cuadro N° 3. Liberaciones promedio de agua obtenidas por las cápsulas ovoides para las diferentes proporciones de mezclas en medio acuoso y bajo diferentes cargas hidráulicas.

Liberaciones de agua en litros/día					
Carga (m)	Repetición	Proporciones de mezclas barbotina-aserrín			
		100:0	90:10	85:15	80:20
0.25	I	3.35	6.94	9.55	14.70
	II	3.60	5.87	9.18	13.57
	III	2.88	6.47	9.45	13.78
	IV	3.30	6.16	8.58	12.19
	Promedio	3.28	6.36	9.19	13.56
0.50	I	7.10	12.11	19.62	27.93
	II	8.44	13.19	17.88	32.02
	III	6.68	13.02	18.70	28.65
	IV	5.58	11.65	20.92	29.56
	Promedio	6.95	12.49	19.28	29.54
0.75	I	10.95	13.14	30.87	44.77
	II	11.17	22.10	29.51	41.93
	III	11.37	21.91	27.81	48.20
	IV	11.28	26.57	35.19	44.80
	Promedio	11.19	23.43	30.85	44.93
1.00	I	11.94	22.81	23.21	66.36
	II	10.73	28.30	28.45	64.83
	III	15.91	31.07	44.06	63.96
	IV	10.01	28.11	37.64	48.21
	Promedio	12.15	27.57	33.34	60.84

Cuadro N° 4 . Propiedades hidráulicas de las cápsulas porosas ovoides de acuerdo a las proporciones de mezcla

Mezcla	Nº	Superficie teórica interna* (cm)	Superficie corregida interna** (cm)	Superficie teórica externa* (cm)	Superficie corregida externa*** (cm)	Superficie promedio (cm)	Caudal (cm ³ /hr)	Carga hidráulica ***** (cm)
100:0	1	347.13	368.17	414.5	439.25	403.71	351.67	50
	2	338.87	358.06	417.21	442.15	400.10	232.50	50
	3	344.81	365.50	414.41	439.16	402.33	295.83	50
	4	333.74	352.95	407.04	431.31	392.13	278.33	50
90:10	1	342.81	362.82	417.73	442.70	402.76	542.50	50
	2	345.16	365.31	420.24	445.38	405.35	549.58	50
	3	335.99	355.95	410.58	435.08	395.51	485.42	50
	4	340.81	360.71	417.63	442.60	401.66	504.58	50
85:15	1	335.20	354.57	416.83	441.74	398.15	871.6	50
	2	328.85	347.37	411.05	435.58	391.47	779.17	50
	3	334.72	353.77	418.53	443.66	398.72	745.50	50
	4	330.08	348.98	411.48	436.03	392.50	817.50	50
80:20	1	301.59	318.84	405.18	429.32	374.08	1193.75	50
	2	299.66	317.22	404.74	428.85	373.03	1163.75	50
	3	301.41	318.83	399.46	423.23	371.03	1231.67	50
	4	312.04	330.03	406.77	431.06	380.52	1334.17	50

* De acuerdo a la ecuación 3.4

** De acuerdo a la ecuación 4.2

*** De acuerdo a la ecuación 4.3

**** Valor tomado como referencia.

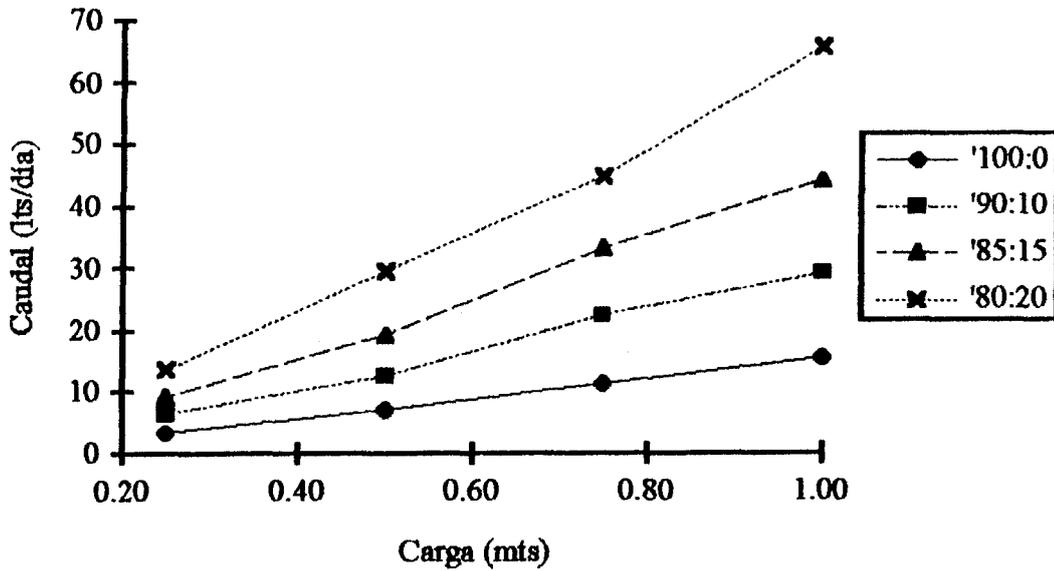


Figura N° 2. Curvas de liberaciones de agua de las capsulas porosas ovoides para las diferentes cargas hidrostáticas y mezclas barbotina-aserrín.

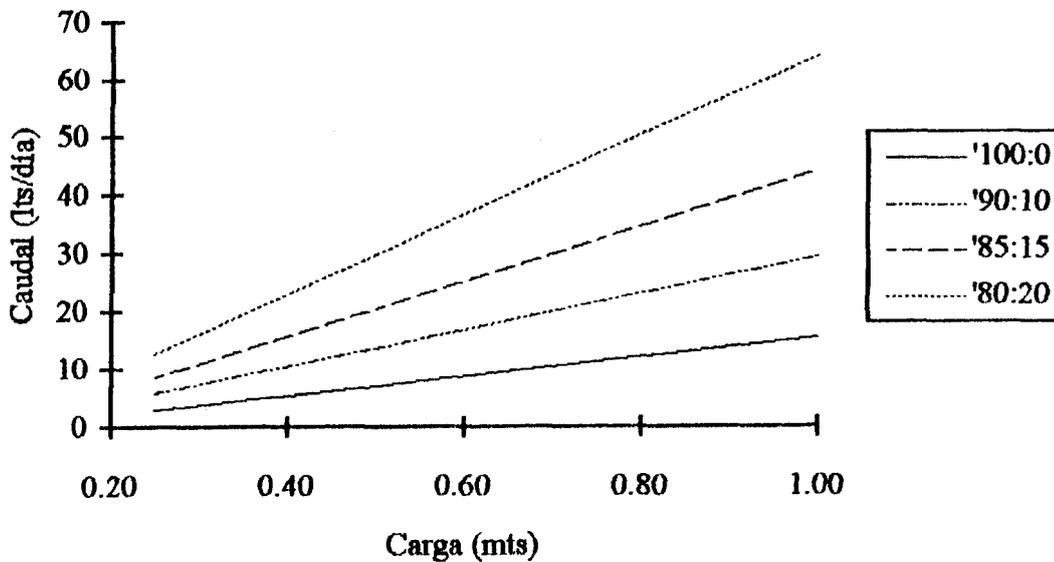


Figura N° 3. Curvas de predicción de liberaciones de agua de las cápsulas porosas ovoides con las diferentes cargas hidrostáticas y mezclas

4.3.2 Evaluación de liberaciones de agua en medio acuoso

En esta evaluación se obtuvieron los datos de liberaciones de agua (cuadro N° 3), y de acuerdo a las dimensiones de las cápsulas, se procedió al cálculo de sus propiedades hidráulicas bajo condiciones de flujo saturado (medio acuoso) (cuadro N° 4).

4.3.2.1. Curvas caudal-carga

Con los resultados obtenidos en las pruebas de liberación de agua se elaboró las gráficas correspondientes a cada tipo de mezcla (figura N° 2), determinándose a través de la tendencia de estas, regresiones de tipo lineal obteniendo los respectivos modelos (cuadro N°5) y curvas de predicción para las variables caudal y carga hidráulica (figura N° 3).

Cuadro N° 5. Modelos de predicción para liberaciones de agua por las cápsulas porosas ovoides de arcilla construidas con diferentes mezclas de materiales y sometidas a diferentes cargas hidráulicas.

Proporciones de mezclas Barbotina-aserrín	Liberaciones de agua en l/día				y = a + bx Coeficientes de regresión		
	Carga Hidráulica (m)				a	b	r ²
	0.25	0.50	0.75	1.00			
100:0	3.28	6.95	11.19	15.54	-1.0515	16.408	0.999
90:50	6.36	12.49	22.38	29.16	-1.975	31.316	0.996
85:15	9.19	19.28	33.03	44.06	-3.200	47.344	0.998
80:20	13.56	29.54	44.79	65.59	-4.465	68.536	0.997

4.3.2.2 Propiedades físicas de las cápsulas

Estas fueron determinadas siguiendo la metodología propuesta por Singer y Singer, para la determinación de propiedades en materiales cerámicos, obteniéndose datos de densidad y porosidad para cada mezcla; los resultados promedios se muestran en cuadro N° 6.

Cuadro N° 6. Resumen de las propiedades físicas de las cápsulas porosas ovoides de arcilla.

Proporciones Barbotina-aserrín	D. V. (gr/cm ³)	D. A. S. (gr/cm ³)	D. G. (gr/cm ³)	P. A. (%)	P. V. (%)	P. C. (%)
100:0	2.70	1.657	1.011	38.991	62.574	23.582
90:10	2.60	2.013	1.030	48.790	60.397	11.606
85:15	2.49	2.082	1.005	51.697	59.657	7.959
80:20	2.39	1.982	0.977	50.679	59.129	8.450

D.V.= Densidad verdadera, D. A. S.= Densidad aparente de sólidos, D. G.= Densidad a granel, P. A.= Porosidad aparente, P. V.= Porosidad verdadera, P. C.= Porosidad cerrada.

4.3.2.3 Selección de la mezcla y carga hidráulica.

4.3.2.3 Selección de la mezcla y carga hidráulica

Una vez generadas las curvas caudal-carga se procedió a seleccionar la mezcla más apropiada, resultando ser la de 100:0. La carga hidráulica para la siguiente fase se obtuvo mediante el uso del modelo de predicción correspondiente a la curva de esta mezcla, que proporcionaría un caudal promedio de 5 lts/día, la cual resultó ser de 0.37 m.

4.3.3 Evaluación del bulbo de humedecimiento en diferentes texturas de suelos

La evaluación del bulbo de humedecimiento se llevó a cabo de acuerdo al modelo generado a partir de una hemi-cápsula (una mitad), bajo el supuesto de que la información obtenida es representativa de las condiciones que podría presentar una cápsula entera. El modelo fue necesario para facilitar el estudio del fenómeno (anexo A-13).

4.3.3.1 Propiedades físicas de los suelos.

Dentro de las propiedades físicas de los suelos a evaluar, se encuentran la textura de suelos, el contenido de humedad a diferentes tensiones, con el objeto de generar curvas de retención de humedad, y otras propiedades físicas de los mismos.

4.3.3.1.1 Textura de los suelos de prueba

Según el análisis efectuado con el hidrómetro de Bouyoucos, los suelos presentaban composiciones diferentes de las fracciones de arena, limo y arcilla, con las cuales se ha determinado su textura (cuadro N° 7).

4.3.3.1.3 Curvas de retención de humedad

Con la información obtenida por medio de las pruebas en las ollas de presión se elaboraron las curvas de retención de humedad para las distintas texturas de suelo (figura N° 4), así mismo se han determinado las constantes hídricas de los suelos en estudio.

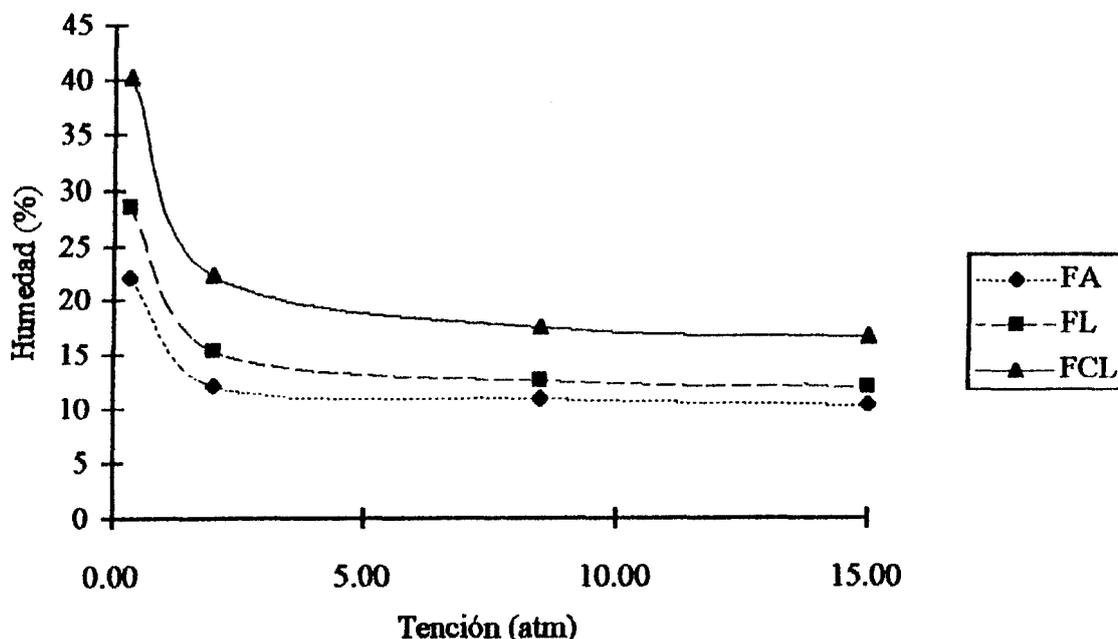


Figura N° 4. Curvas de retención de humedad de los suelos en estudio a diferentes tenciones.

4.3.3.1.4 Otras propiedades físicas de los suelos

Además de la información obtenida anteriormente, se realizaron otras pruebas con el objeto de conocer de una mejor forma las propiedades físicas de los suelos utilizados en el presente estudio; los resultados de dichas pruebas se encuentran en el cuadro N° 9.

Cuadro N° 9. Propiedades físicas de los suelos utilizados para la evaluación del bulbo de humedecimiento.

Textura	A.U.	GEA	GER	n (%)	θ_{wi} (%)	d (mm)
Franco arenosa	11.78	0.944	2.39	60.50	8.51	77.8
Franco limoso	16.55	0.892	2.35	62.01	11.65	103.3
Franco arcillo limoso	23.51	0.939	2.33	59.70	15.00	132.5

A.U.: Agua útil, GEA: Gravedad específica aparente, GER: Gravedad específica real, n: Porosidad, θ_{wi} : Contenido de humedad inicial y d: Lámina de agua.

4.3.3.1.5 Modelo de predicción para las curvas de retención de humedad

Tomando como base la información obtenida en el cuadro N° 8, se procedió a realizar el cálculo de los modelos de predicción para las curvas de retención de humedad (figura N° 5), mediante regresiones exponenciales (cuadro N° 10).

Cuadro N° 10. Coeficientes de regresión para las curvas de retención de humedad de las diferentes texturas de suelos.

Textura	$y = a \cdot x^b$ Coeficientes de regresión		
	a	b	r ²
Franco arenosa	16.586681	-0.19712	0.935
Franco limosa	20.627394	-0.226395	0.935
Franco arcillo limosa	29.24738	-0.231701	0.959

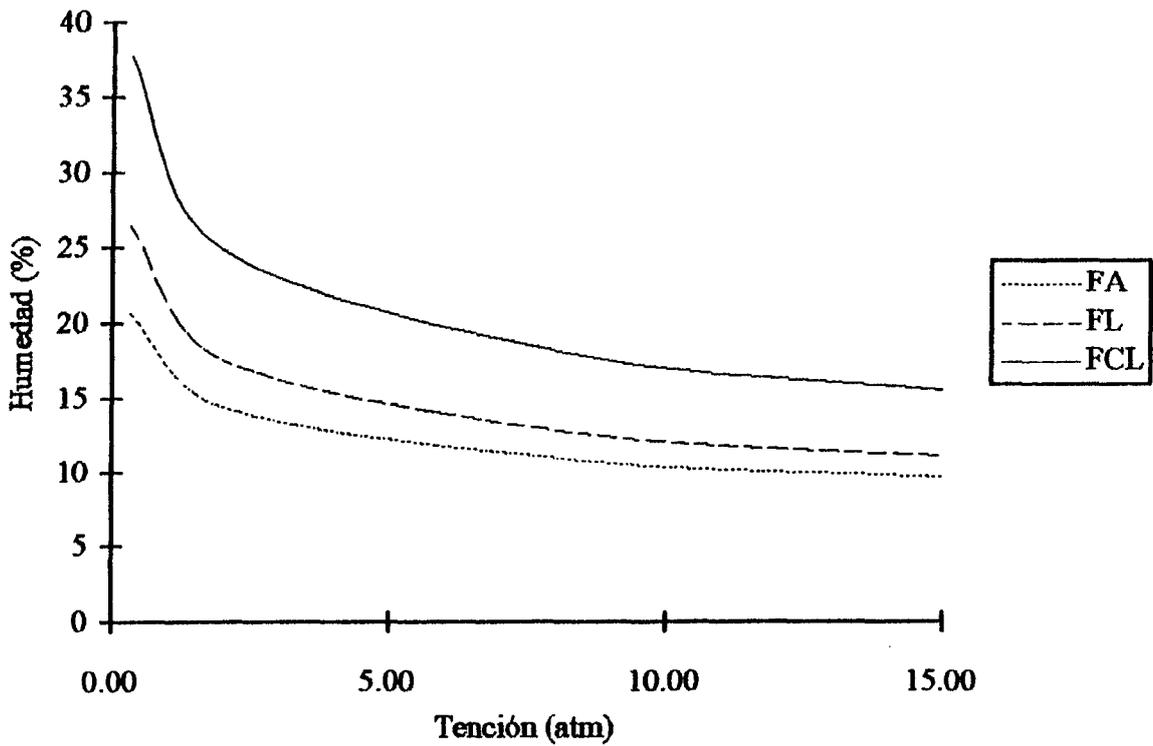


Figura N° 5. Curvas de predicción de retención de humedad de los suelos en estudio a diferentes tensiones.

4.3.3.2. Diámetro del bulbo de humedecimiento

El estudio del bulbo de humedecimiento se llevó a cabo tomando en cuenta los siguientes aspectos: desarrollo de su tamaño, contenido de humedad y gasto de agua.

4.3.3.2.1 Medidas del diámetro del bulbo húmedo

Estas se efectuaron de acuerdo a la velocidad de difusión que presentó el agua en cada una de las diferentes texturas, computando los datos del diámetro de acuerdo al desarrollo del bulbo, y en función del tiempo. Los bulbos formados en las distintas texturas de suelos poseían características bastante similares en cuanto a la forma que desarrollaron, la cual se caracterizaba por una distancia bastante uniforme del frente de mojado con respecto a la cápsula, lo cual se pudo notar tanto en la vista frontal del modelo (anexo A-19), como en la vista en planta de éste (anexo A-20). Si se pudo notar una diferencia significativa en cuanto a la velocidad de crecimiento de los bulbos, dependiendo esto de la textura, siendo más lento el avance en el suelo franco arcillo limoso y más rápido en el franco arenoso; un esquema en el cual se ilustra este fenómeno se encuentra en el anexo A-21. Los resultados de las mediciones efectuadas (cuadro N° 11), las curvas (figura N° 6 y 7) que describen la tendencia de este fenómeno, que corresponden a la repetición I y II respectivamente. Luego se obtuvo el modelo de predicción del diámetro húmedo para cada textura, por regresión múltiple cuadrática semilogarítmica; dado que se tenía dos ecuaciones para cada textura de suelo, se optó por obtener una curva promedio, de la cual se obtuvo sus correspondientes coeficientes (cuadro N° 12), las curvas promedios para cada una de las texturas de suelos están en la figura N° 8.

Cuadro N° 11. Medidas del diámetro del bulbo húmedo con respecto al tiempo en las texturas de suelo.

Textura	Franco arenoso		Franco limoso		Franco arcillo limoso	
	Variable	Tiempo (horas)	Diámetro (cm)	Tiempo (horas)	Diámetro (cm)	Tiempo (horas)
Repetición I	0.35	5.12	0.13	12.00	0.10	12.00
	0.87	11.54	0.37	14.40	0.33	14.50
	1.62	16.73	0.82	16.80	0.72	17.00
	2.88	23.08	1.38	19.50	1.23	19.80
	5.60	30.46	2.13	22.00	1.87	22.00
	10.92	37.76	3.03	23.80	2.58	24.00
	18.17	44.45	5.17	28.00	3.58	26.50
	25.33	49.52	9.33	33.70	6.93	32.30
	42.65	59.16	16.37	40.50	12.58	39.10
	69.25	70.63	22.88	45.50	14.02	40.00
	--	--	42.75	57.00	21.12	45.40
	--	--	--	--	42.87	55.50
	--	--	--	--	69.50	63.00
	--	--	--	--	94.57	67.00
	--	--	--	--	117.95	70.00
--	--	--	--	141.87	73.50	
--	--	--	--	188.65	80.00	
Repetición II	0.13	11.50	0.37	13.10	0.60	12.50
	0.40	14.50	0.83	16.00	1.27	14.80
	0.70	17.30	1.40	18.00	2.17	17.00
	1.27	20.80	2.02	20.00	3.18	19.00
	1.90	23.50	3.02	23.00	6.95	24.20
	2.42	26.00	5.70	28.50	13.92	30.00
	3.02	28.80	10.80	35.20	23.67	35.50
	4.93	33.50	18.17	41.00	42.82	43.00
	9.10	41.50	23.53	45.00	69.30	50.00
	18.00	50.00	42.70	54.00	94.42	55.00
	23.42	54.00	--	--	117.42	59.50
	27.60	56.00	--	--	141.68	62.50
	--	--	--	--	187.07	68.00

Cuadro N° 12. Modelos de predicción para las medidas del diámetro del bulbo húmedo en tres texturas de suelo

Textura	Modelo de predicción	r ²
Franco arenosa	$y = 20.752602 + 16.503528 (\log x) + 7.0740305 (\log x)^2$	0.998
Franco limosa	$y = 16.622098 + 10.59359 (\log x) + 7.735759 (\log x)^2$	0.996
Franco arcillo limoso	$y = 16.055868 + 8.324732 (\log x) + 7.3887035 (\log x)^2$	0.999

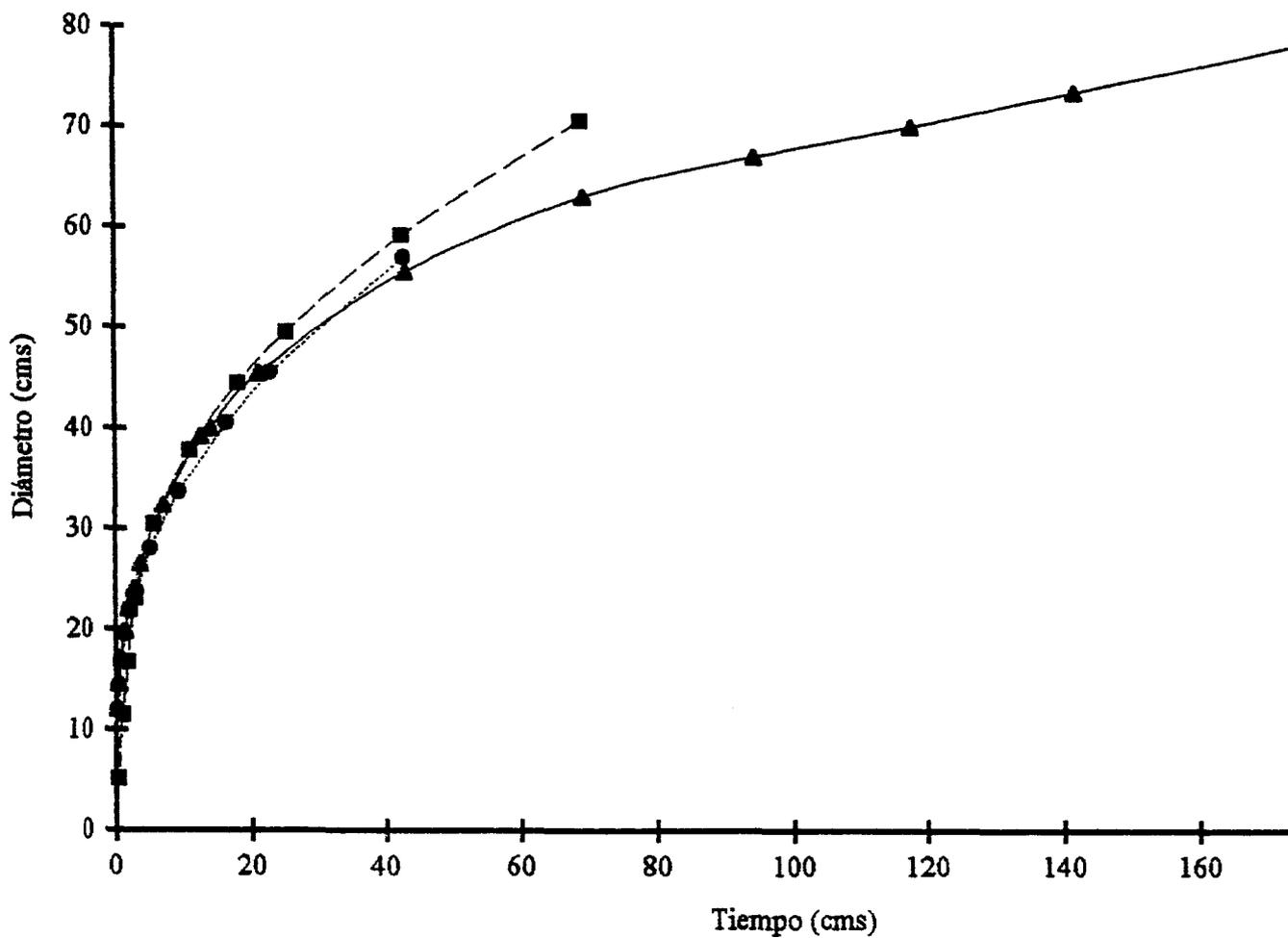


Figura N° 6. Curvas del tamaño del diámetro del bulbo de humedecimiento con respecto a

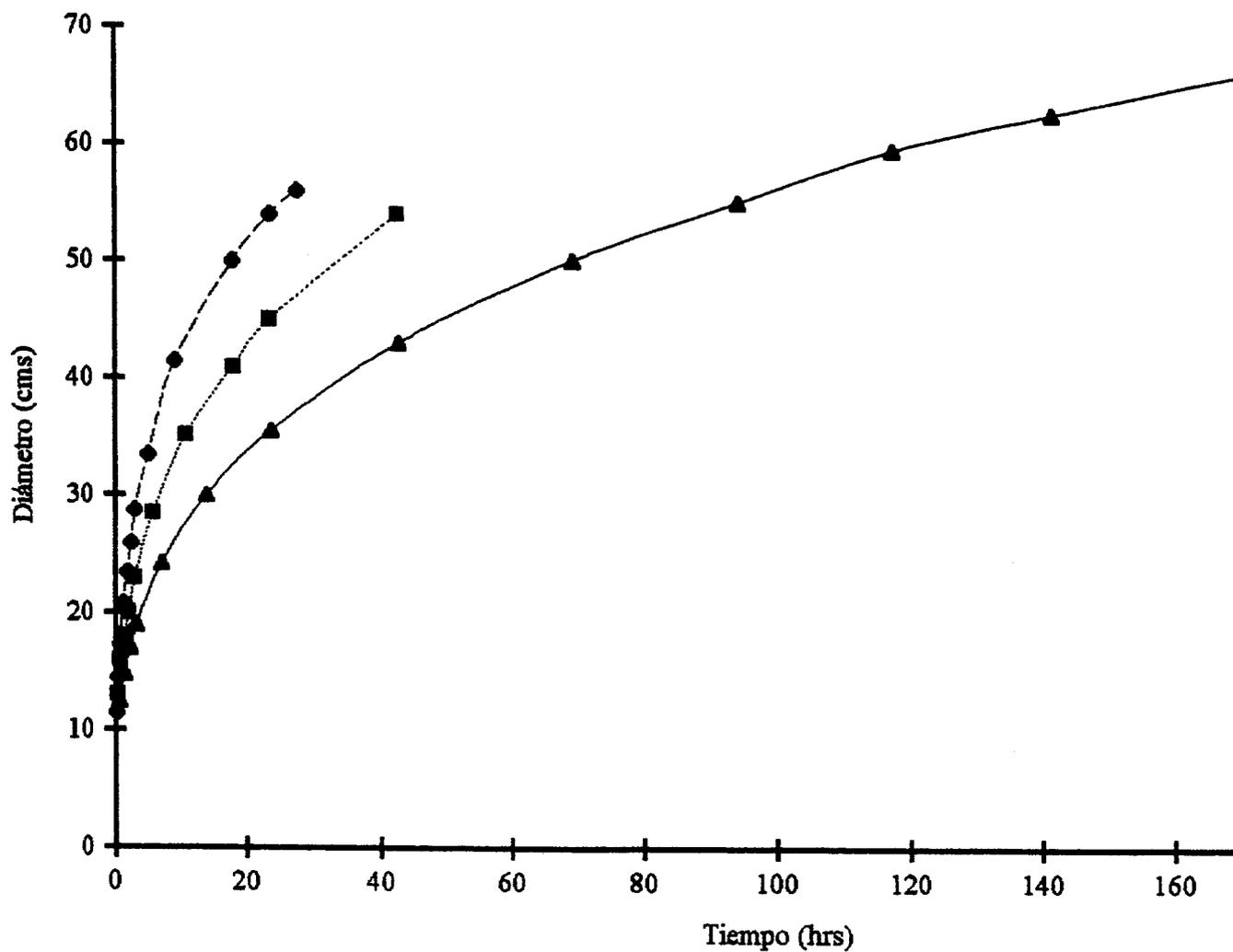


Figura N° 7. Curvas del tamaño del diámetro del bulbo de humedecimiento con respecto al tiempo. Repet

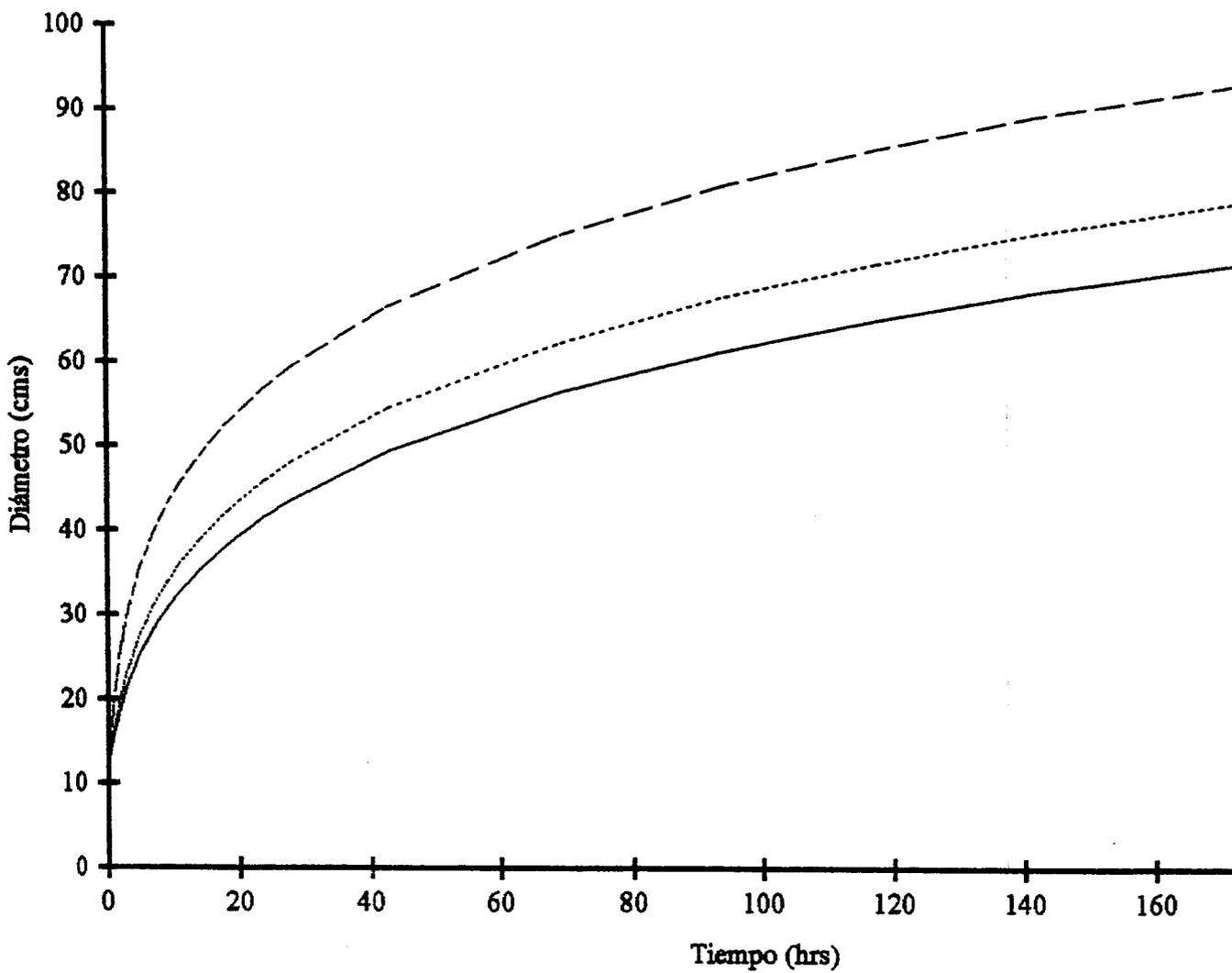


Figura N° 8. Curvas de predicción del tamaño del diámetro del bulbo de humedecimiento, de los diferentes
función del tiempo.

108

4.3.3.3. Gasto de agua

Al mismo tiempo que se computaron los datos sobre desarrollo del diámetro húmedo, también se llevó el registro del gasto de agua en las distintas cajas de prueba, en función del tiempo (cuadro N° 14). Las curvas generadas por el gasto de agua obedecen a un comportamiento casi lineal, con una pequeña tendencia a decrecer (figura N° 9).

4.3.3.4. Contenido de humedad del bulbo

El contenido de humedad en los bulbos se determinó en forma gravimétrica (cuadro N° 13), con los cuales se elaboraron curvas para observar la tendencia (figura N°10).

Cuadro 13. Distribución del contenido de humedad en los bulbos obtenidos en las diferentes texturas de suelo.

Textura	Franco arenosa		Franco limosa		Franco arcillo limosa	
	Distancia (cm)	Humedad (%)	Distancia (cm)	Humedad (%)	Distancia (cm)	Humedad (%)
Datos	2.50	25.70	2.50	27.19	2.50	31.65
	7.50	24.89	7.50	25.21	7.50	29.63
	12.50	23.13	12.50	23.05	12.50	26.98
	17.50	20.78	17.50	20.66	17.50	25.04
	24.00	17.37	23.38	17.04	22.50	22.53
	--	--	--	--	29.75	20.54

Cuadro N° 14. Datos de gasto de volumen de agua por cápsula obtenidos a nivel de ensayo en diferentes texturas de suelo.

Textura Variable	Franco arenoso		Franco limoso		Franco arcillo limoso	
	Tiempo (horas)	Volumen (litros)	Tiempo (horas)	Volumen (litros)	Tiempo (horas)	Volumen (litros)
Repetición I	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.35	0.12	0.13	0.12	0.10	0.12
	0.87	0.36	0.37	0.24	0.33	0.24
	1.62	0.60	0.82	0.48	0.72	0.60
	2.88	0.84	1.38	0.82	1.23	0.84
	5.60	1.70	2.13	1.42	1.87	1.22
	8.38	1.88	3.03	1.76	2.58	1.58
	10.92	2.36	5.17	2.48	3.58	2.18
	16.37	3.28	9.33	3.88	6.93	3.88
	18.17	3.52	11.05	4.48	11.23	5.70
	25.33	4.90	16.37	6.12	12.58	6.24
	42.65	8.00	19.62	7.12	14.02	6.72
	69.25	12.06	22.88	7.76	16.13	7.58
	--	--	27.68	9.52	21.12	9.40
	--	--	42.75	14.06	23.05	10.12
	--	--	--	--	42.87	15.58
	--	--	--	--	69.50	21.28
--	--	--	--	94.57	25.76	
--	--	--	--	117.95	29.76	
--	--	--	--	141.87	33.64	
--	--	--	--	188.65	40.06	
Repetición II	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.13	0.60	0.37	0.24	0.60	0.24
	0.40	1.10	0.83	0.48	1.27	0.36
	0.70	1.34	1.40	0.70	2.17	0.48
	1.27	1.82	2.02	1.06	3.18	0.72
	1.90	2.30	3.02	1.30	6.95	1.28
	2.42	2.78	5.70	2.24	8.40	1.64
	3.02	3.40	8.35	3.42	13.92	2.60
	4.93	4.72	10.80	4.30	16.03	3.10
	9.10	7.28	15.88	5.94	23.67	4.48
	10.80	8.24	18.17	6.64	29.07	5.40
	15.73	10.66	19.63	7.12	42.82	7.52
	18.00	11.64	23.53	8.30	47.70	8.30
	19.60	12.42	27.67	9.48	69.30	11.34
	22.70	13.76	29.12	10.00	94.42	14.60
	23.42	14.24	42.70	13.48	117.42	17.64
	27.60	16.18	--	--	141.68	20.66
--	--	--	--	187.07	26.00	

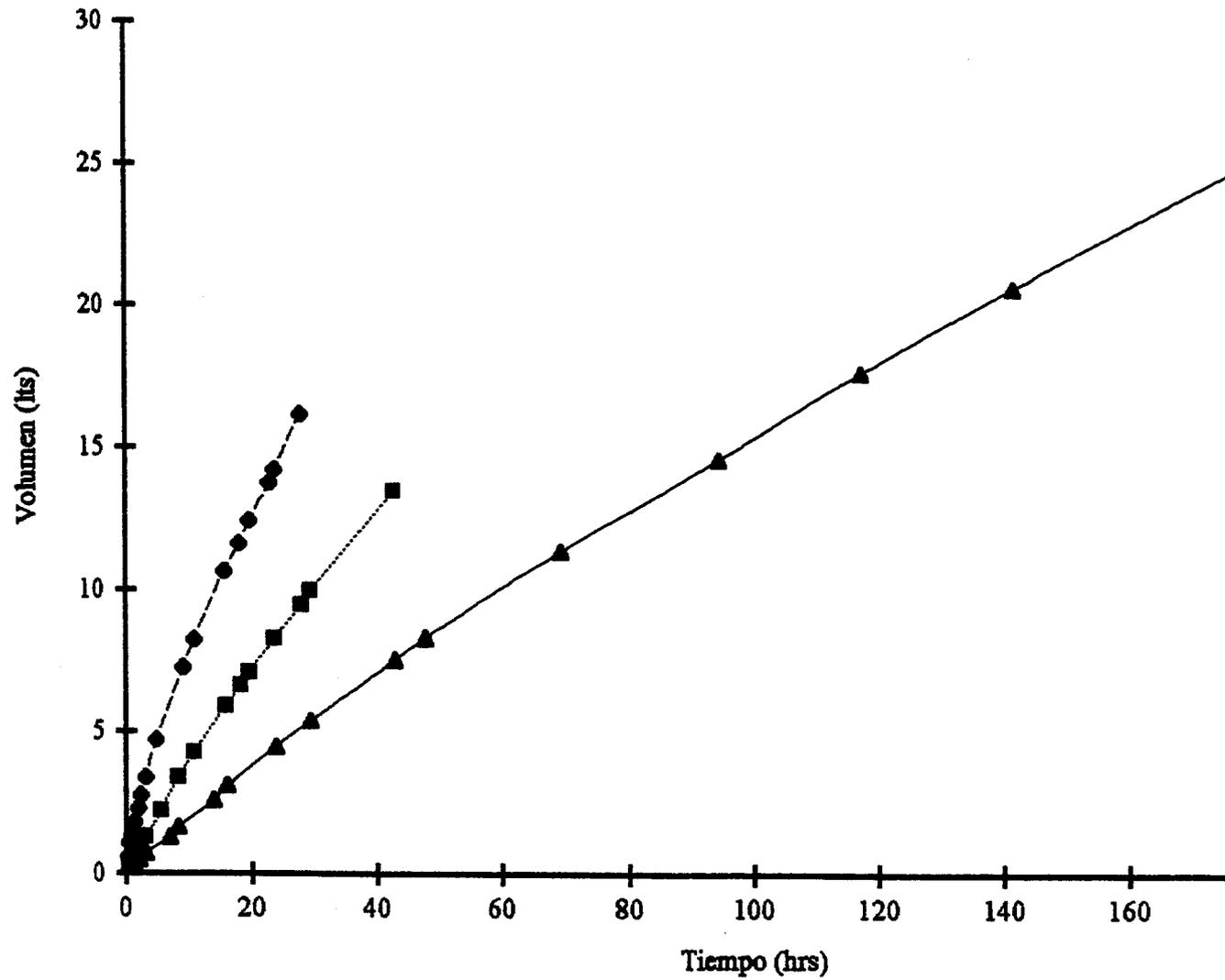


Figura Nº 9 . Curvas del gasto de agua en las diferentes texturas de suelos, en función del tiempo.

4.3.3.5 Modelos de predicción para el contenido de humedad en el bulbo

Posteriormente al análisis de la tendencia de las curvas generadas con la información del contenido de humedad (figura N° 10), se obtuvieron los modelos de predicción para las diferentes texturas de suelos (cuadro N° 15), haciendo uso de regresiones múltiples cuadráticas (figura N°11).

Cuadro 15. Modelos matemáticos obtenidos para el contenido de humedad en los bulbos.

Textura	Modelo de predicción	r ²
Franco arenosa	$y = 26.113243 - 0.102454(x) - 0.011026(x)^2$	0.997
Franco limosa	$y = 27.936163 - 0.30014(x) - 0.007006(x)^2$	0.999
Franco arcillo limoso	$y = 33.151099 - 0.535247(x) + 0.003569(x)^2$	0.994

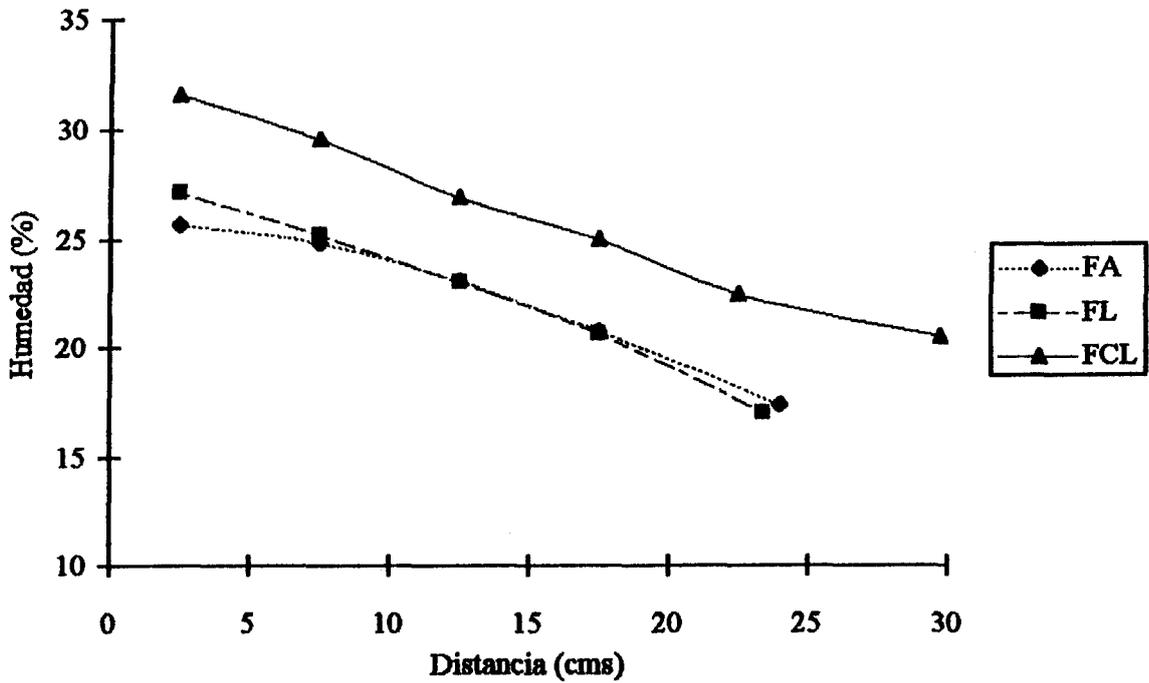


Figura N° 10. Curvas de contenido de humedad en los bulbos de humedecimiento de los suelos en estudio.

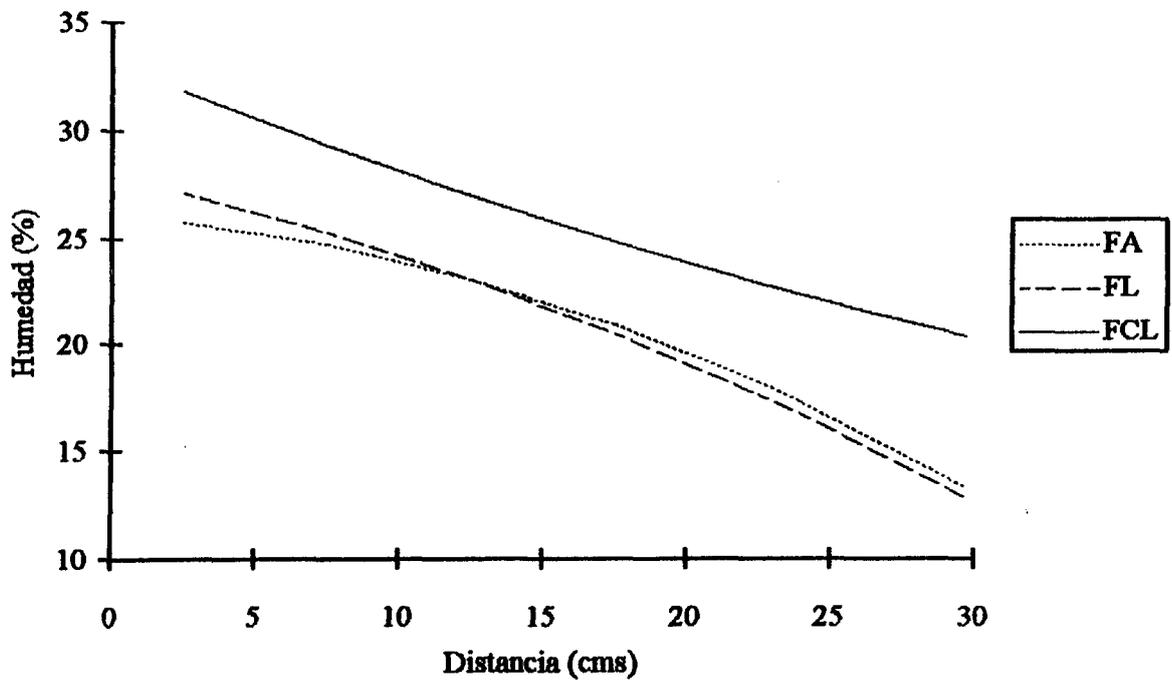


Figura N° 11. Curvas de predicción de la distribución de la humedad en los bulbos de humedecimiento de los suelos en estudio.

4.4 Costos de producción

4.4.1 Costo de arcilla de loza

Para la obtención de una cápsula se gastó un peso promedio de 356.72 g, lo cual tomando en consideración la densidad de la barbotina que igual a 1.736 g/cm³, se tiene un volumen correspondientes de barbotina de 205.48 cm³.

Con una bolsa de arcilla de 22.7 Kg (50 lbs), se puede producir una cantidad de 32.727 Kg de barbotina líquida, con la que se pueden construir 89 cápsulas, considerando un 3% desperdicio. El precio de una bolsa de arcilla de loza es de ₡127.12², obteniendo un costo por cápsula de ₡1.42.

4.4.2 Costo del silicato de sodio

Este material es utilizado en pequeñas proporciones para la elaboración de barbotinas, teniéndose que para una bolsa de 22,7 Kg de arcilla de loza se utilizan 72 g de silicato; el precio de este material está incluido en el precio de la bolsa de arcilla de loza, por lo que no se considera como un costo adicional a la cápsula.

² EGE, MIRIAN DE. 1997. Precio de materiales cerámicos. Casa Mirian, San Salvador, El Salvador. (Comunicación personal).

4.4.3 Costo de la mano de obra

Para la construcción de las cápsula es considerada la contratación de dos operarios, con un salario mínimo de ₡1,050 por operario, devengando un salario semanal de ₡490.00, con una producción de 360 cápsulas, haciendo un total por semana (5.5 días) de 1,980 cápsulas, obteniendo un costo de mano de obra por cápsula de ₡0.25.

4.4.4 Gasto de yeso

Para la elaboración de moldes se utilizó escayola, teniéndose que un molde completo se necesita de 3,625 g de ésta, obteniendo moldes con un peso promedio de 4,300 g de yeso (escayola hidratada). Una bolsa de 22.7 Kg (50 lbs), de la cual se pueden obtener 6.26 moldes.

El precio de una bolsa de escayola es de ₡69.00, lo que da un costo por molde de ₡11.00; considerando un salario mínimo de ₡1,050 por operario, se tiene que el costo de hechura del molde equivale a ₡2.78, por lo que el molde tiene un costo total de ₡13.70 y considerando una utilización de 300 veces el molde, según Singer y Singer, se tiene un costo por depreciación de ₡0.05/moldado.

4.4.5 Costos de acabado y aplicación de gley

Se considera un gasto adicional estimado de ₡0.05/cápsula.

4.4.6 Costo de quema de las cápsulas

Según Cuestas³, para la quema de 100 cápsulas, se tiene un gasto de energía eléctrica de ₡30.00 y una depreciación del horno de ₡25.00/quema, por lo que el costo de quema por cápsula es de ₡0.55.

4.4.7 Costo de arrendamiento de local

Teniendo un taller pequeño con dos operarios, con un de arrendamiento de local mensual de ₡350.00, se tiene un costo semanal de arrendamiento de ₡81.66, al agregar el costo de arrendamiento a la cápsula construida, este es de ₡0.04/cápsula.

4.4.8 Costo de transporte

El transporte de los materiales del lugar de adquisición al taller, hace necesario contratar un medio para tal fin, por lo que se considera la compra de materiales para suplir las necesidades del taller, una vez cada 4 semanas, transportando un promedio de 45 bolsas de arcilla y 1 bolsa de yeso con un peso total de 1,045 Kg (23 quintales). Contratando un vehículo de 3 toneladas, a precio de ₡150.00/ viaje, se tiene un costo semanal de transporte de ₡37.50. lo que agregado al costo de las cápsulas sería ₡0.02/cápsula.

³ CUESTAS CRUZ, A. 1997. Costos de quema de piezas cerámicas. Escuela de Artes, Universidad de El Salvador.

4.4.9 Costos de servicios

En este apartado son considerados los gastos de energía eléctrica (fuera de la que usa el horno) y el agua dentro del taller, teniendo un gasto de ambos de ₡100.00, lo que da un costo semanal de ₡23.33, adicionando un costo de ₡0.01/cápsula.

4.4.10 Otros costos

Dentro de estos costos se consideran la depreciación del utillaje y equipo del taller, así como gastos de mantenimiento de este, como por ejemplo:

- Depósitos para elaborar barbotina y para su manipulación
- Madera para elaboración de marcos para moldes
- Bentonita
- Espátulas, desbastadores y lija
- Báscula de reloj
- Mesas y tarimas
- Motor eléctrico con hélice

Con lo que se tiene un incremento del costo de ₡0.44/cápsula.

4.4.11 Costo total de la cápsula

De acuerdo con los análisis realizados anteriormente el costo por cápsula sería el siguiente:

- Arcilla	₺1.42
- Mano de obra	₺0.25
- Acabado y aplicación de gley	₺0.05
- Depreciación del molde	₺0.05
- Quema	₺0.55
- Local	₺0.04
- Transporte	₺0.02
- Servicios	₺0.01
- Otros costos	₺0.44
<hr/>	
TOTAL	₺2.87 / cápsula.

5. DISCUSION DE RESULTADOS

5.1 El diseño y construcción de la cápsula

5.1.1 Formas y métodos de construcción

El elemento de diseño fue un factor importante en la escogitación del método de construcción ha utilizar, así en un primer momento se retomó la experiencia de Olgin (13), el cual al igual que Silva (23) utilizaron la forma de cono truncado. La forma del cono truncado se construyó con el método de torno de alfarero, pero debido a la desuniformidad que presentó en sus dimensiones el método y la forma fueron descartados; cabe mencionar que Silva utilizó el método de colada con barbotina para la elaboración de cápsulas con forma de cono truncado.

Posteriormente se utilizó la forma cilíndrica utilizada por Valle (29), quien hacía uso de cápsulas elaboradas con dos piezas, unidas con pegamento. En el presente estudio esta forma fue fabricada utilizando el método de repujado en molde de yeso, logrando cápsulas con buen aspecto externo, pero que presentaba problemas de falta de uniformidad, pues debido a la unión que se hacía con las dos partes originales, al pegarlas con barbotina (antes de ser cocidas), al momento de realizar las pruebas hidráulicas las partes de la cápsula tendían a separarse, presentando además una gran fragilidad, especialmente en las protuberancias de interconexión, lo cual se debía al tipo de material utilizado para la construcción, que al igual que en el cono truncado, era la arcilla procedente de Ilobasco.

El método de repujado en el molde de yeso usado para la construcción de la forma cilíndrica era la razón principal de la falla en las cápsulas, pero la forma de estas también

contribuyó a la falla estructural. De haber probado la forma de cono truncado con el método de repujado en molde de yeso se hubiese presentado el mismo problema, razón por la cual ya no se práctico dicho ensayo.

El método de colada con barbotina ofrecía la posibilidad de realizar cápsulas de una sola pieza, pero la arcilla de Ilobasco no se puede trabajar con este método, debido a que no forma una buena barbotina para colada y que según Singer y Singer (22), la desfloculación de este tipo de arcilla solo podía lograrse con metodologías especializadas, que no compensarían el costo.

Para este caso el material más adecuado es la arcilla de loza la cual se puede encontrar en el mercado nacional.

Debido a los problemas que presentaron las formas de cono truncado y cilindro, se aprovechó las ventajas de este método con la forma del ovoide, el cual superó las limitantes de las formas anteriores.

La forma de ovoide se realizó solamente con una medida de sus dimensiones (cuadro N° 2); las cápsulas ensayadas, dieron como resultado, liberaciones de agua promedio desde 3.28 l/día, hasta 65.59 l/día.

5.1.2 Aditivos para la porosidad

En cuanto a los aditivos utilizados para la formación de porosidad, se encontró que el estiércol de bovino producía grumos en la mezcla con la barbotina, lo cual es un efecto indeseable. El carbonato de calcio provocó un efecto de sedimentación de la mezcla, lo cual trajo como resultado la formación de paredes gruesas y desuniformes en la cápsula (anexo A-15); aunque este

problema fue superado, las cápsulas al ser quemadas, contenían en su estructura óxido de calcio producto de la calcinación del carbonato de calcio; debido a esto, cuando las cápsulas se expusieron al medio ambiente, el óxido se hidrató y destruyó completamente la estructura de la cápsula.

El aserrín usado como aditivo no ocasionó variantes significativas en la condición de la barbotina para la colada, y luego de la quema, las cápsulas no mostraban defectos estructurales considerables; un efecto que si se pudo advertir fue el aumento del espesor de las cápsulas, al aumentar la proporción de aserrín en la mezcla, lo cual según Cuestas⁴, se debe a que el aserrín contenido en la barbotina, al ser vaciado en los moldes de yeso da origen a una competencia de absorción de humedad en contra del molde de yeso, dando así origen a diferentes espesores en las paredes de las cápsulas (cuadro N° 2). Tomando en cuenta que el tiempo de fraguado fue igual para todas las cápsulas (5 min), se obtuvo diferentes valores promedios de espesor para cada mezcla: 100:0, con espesor de 0.313 cm, 90:10, con espesor de 0.336 cm, 85:15, con espesor de 0.386 cm y 80:20, con espesor de 0.55 cm.

5.2 Evaluación hidráulica

5.2.1 Liberaciones de agua en medio acuoso

Las cápsulas construidas con las diferentes mezclas fueron sometidas a las cargas hidrostáticas establecidas de 0.25, 0.5, 0.75 y 1.00 m, obteniéndose una relación directamente proporcional entre la carga hidráulica aplicada y las liberaciones de agua de las cápsulas, dando

⁴CUESTAS CRUZ, A. 1997. Comportamiento del aserrín en la colada. Escuela de Artes, Universidad de El Salvador. (Comunicación personal).

como resultado una serie de curvas que representan los caudales de las diferentes mezclas (figura N° 2 y 3). Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Olgín, quien encontró que el flujo a través de las cápsulas porosas puede describirse mediante la ley de Darcy, ya que el gasto fue proporcional al gradiente hidráulico; el mismo resultado fue obtenido por Vargas (25), quien concluyó que los caudales obtenidos varían según la carga hidrostática que se le aplique, y en un estudio similar Silva et al (23), obtuvo liberaciones de agua en el rango de 0.1 a 36.0 litros por día, coincidiendo con los demás autores y con la información obtenida en este estudio (cuadro N° 3), en que existe una relación directamente proporcional entre la carga hidráulica aplicada y las liberaciones de agua por las cápsulas

La proporción de aserrín en la mezcla con barbotina, provocó una variación en la porosidad de las cápsulas (cuadro N° 6), así al aumentar el contenido de aserrín, aumentaba también la porosidad. En una investigación similar, Silva (23), encontró que al variar la cantidad de aditivo contenido en la barbotina, también variaba la porosidad de las cápsulas, lo cual lo condujo a concluir que las liberaciones de agua se encontraban en función de las proporciones del aditivo en la mezcla, haciendo notar que el mecanismo responsable de la formación de porosidad capilar final en las cápsulas, era el proceso de quema del aditivo.

Para el caso del presente estudio, es a través de la combustión del aserrín que se consigue la formación de porosidad en las cápsulas; aunque es necesario aclarar que con el método de inclusión de material combustible en la mezcla, no se logra una máxima uniformidad en la porosidad de las cápsulas, lo cual es aseverado por Singer y Singer (22), cuando se refieren a que el método en mención conduce a poros de tamaño irregular y a una deficiente resistencia. Además estos autores mencionan que el mejor método para formar porosidad, es mediante la adición de chamota del mismo material a la mezcla; pero esta metodología no es aplicable a las condiciones

locales, dado que requiere equipo especial, lo cual aumentaría considerablemente los costos de producción de las cápsulas.

Al revisar el cuadro N° 6 se puede observar que la porosidad aparente es mayor para la mezcla que contienen más aserrín (85:15 y 80:20) y menor para las mezclas de baja proporción de aserrín (100:0 y 90:10), a pesar de que la porosidad total o verdadera se comportó de manera contraria, lo cual indica que el aserrín asegura un tamaño más grande de poros y una continuidad de estos; y se corrobora al ver los valores de porosidad cerrada los cuales son menores en las cápsulas de 80:20 y 85:15. Esto trajo como resultado que las cápsulas con mayor proporción de aserrín respondieran más a las variaciones de carga hidráulica, lo cual puede apreciarse al observar los valores de la pendiente de los modelos generados (cuadro N° 5): 100:0 = 16.408; 90:10 = 31.316, 85:15 = 47.344 y 80:20 = 68.536, lo cual significa que por cada metro de carga hidráulica que se adicione a las cápsulas, se obtendrá dicho valor como variación en liberación de agua (lt/día).

De acuerdo con el rango de liberaciones de agua de las diferentes proporciones y considerando el criterio utilizado por Silva (23), de tomar en cuenta aquellas cápsulas con proporciones de mezcla que lograran liberaciones de agua de aproximadamente 3.0 lt/día con presiones hidrostáticas de 0.25 m, se optó por seguir las pruebas posteriores en suelos con la mezcla de 100:0, la cual no poseía aserrín. Otro aspecto a considerar para escoger la proporción de mezcla más adecuada para la siguiente fase del estudio, fue el grado de variabilidad de las liberaciones de agua con respecto a los cambios en las cargas hidráulicas. De esta manera para las cápsulas de 100:0 se obtuvo un rango de liberaciones de 3.28 a 15.54 lt/día para cargas de 0.25 a 1.0 m, lo cual es deseable para fines de diseño de sistemas de irrigación.

El criterio utilizado por Silva (23), posee un significado práctico, si se analiza que un caudal mínimo de 3 litros/día teóricamente puede compensar las pérdidas de agua en 1 m² de cultivo con una ETc de 3.0 mm/día; pero en hay que tomar en cuenta que este caudal se da solo en función de la carga hidráulica, y que este aumentará cuando la cápsula esté en contacto con el suelo, en una magnitud que dependerá de las características de éste.

Los valores de permeabilidad obtenidos (cuadro N°4) varían de 0.0090 cm/hr hasta 0.072 cm/hr, lo cual es bueno si se considera que en otras investigaciones como la realizada por Silva et al (23), obtuvieron valores de 0.0054 cm/hr, Santos (23) obtuvo valores que oscilaban entre 0.004 y 0.008 cm/hr, y Rendon (23) reportó valores de 0.0057 cm/hr, así para el caso de la mezcla 100:0 el valor promedio concuerda con los obtenidos en estas investigaciones.

5.2.2 El bulbo de humedecimiento y su comportamiento en diferentes texturas de suelo.

5.2.2.1 El contenido de humedad del bulbo.

La humedad en las diferentes partes del bulbo fue determinada en forma gravimétrica, obteniendo valores para las tres texturas de suelo, los cuales en términos generales poseían un contenido de humedad correspondiente a la clasificada como fácilmente aprovechable, mostrando una tendencia a estar menos retenida en la textura franco arenosa y más retenida en la textura franco arcillo limosa (cuadro N° 8). Este comportamiento coincide con lo planteado por Kramer (14), quien sostiene que los suelos arenosos, con su mayor cantidad de espacio poroso no capilar, liberan la mayor parte de su agua dentro de estrechos límites de potencial, debido precisamente al predominio de poros grandes, además manifiesta que los suelos de textura fina son los que poseen

límites más amplios de contenido de agua fácilmente aprovechable, en contraposición a los suelos de textura gruesa. Esta situación puede reafirmarse al observar la tendencia de las curvas de retención de humedad de los distintos tipos de suelo (figura N° 4 y 5), con las cuales se pueden obtener los valores de la tensión en los diferentes puntos de los bulbos húmedos a partir de sus correspondientes valores de contenido de humedad.

Partiendo de esta información, en el caso del bulbo que se desarrolló en el suelo de textura franco arenosa, el valor de la tensión a una distancia de 2.5 cm de la cápsula fue de 0.11 atm y a 24 cm fue de 0.79 atm. lo cual muestra la facilidad con la que puede aprovecharse este contenido de humedad, tomando en cuenta que estos valores se encuentran cercanos a la capacidad de campo (0.33 atm). En el caso de la textura franco limosa, la tensión a 2.5 cm de la cápsula es de 0.30 atm y a 23.83 cm es de 2.33 atm; para la textura franco arcillo limosa, el contenido de humedad a 2.5 cm de la cápsula fue de 0.72 atm, y a los 29.75 cm de 4.6 atm, lo cual a pesar de diferir de los valores que mostró el bulbo del suelo franco arenoso, se ha logrado mantener el agua en su forma disponible bajo las diferentes condiciones. Valle (29) menciona que en el riego por succión, la aireación en la zona radicular es mejor que en otros métodos, dado que el suelo nunca se satura.

Cabe mencionar que el tamaño final de los bulbos se consiguió en diferentes periodos de tiempo, así para la textura franco arenosa el tiempo fue de 27.6 horas, para el franco limoso fue de 42.7 horas y para el franco arcillo limoso fue de 187.1 horas; esta diferencia en el tiempo para alcanzar un tamaño más o menos igual, se debe según Buckman y Brady (5), a que en los suelos arenosos el ajustamiento de la diferencia de potencial es más rápido que en suelos de textura fina, lo cual se ve reflejado en un avance más rápido del frente de mojado en los suelos arenosos. Es importante aclarar que según Baver (4), los valores de contenido de humedad y la difusividad del agua en el bulbo dependen del tiempo transcurrido y por lo tanto de la posición que tenga el frente

de mojado, generando de esta manera una serie de curvas múltiples para un mismo fenómeno, lo cual complica la aplicación de la teoría del flujo a los problemas de tipo práctico.

Debido al tamaño de las cajas, no pudo apreciarse el desarrollo de los bulbos hasta que estos alcanzarán su punto de equilibrio, lo cual ha sido reportado en la investigación realizada por Valle en sistemas de riego por succión, en la cual los primeros en alcanzar este punto fueron los sistemas con cargas menos negativas (-10 y -15 cm), y en su orden fueron alcanzándolo las cargas las cargas más negativas (-20, -25 y -30 cm); después de 38 días de instalado el sistema, los bulbos alcanzaron un diámetro de 45 cm, independientemente de la carga hidráulica utilizada.

Los modelos de predicción generados para este fenómeno coincidieron con un modelo matemático de regresión múltiple cuadrática semilogarítmica, utilizado por Valle (29) para tal fin, con el cual se obtuvo una alta correlación, con un valor promedio de $r^2 = 0.99$ (cuadro N° 12); de manera que los valores a partir del modelo de predicción, se ajustan en gran medida a los valores reales (cuadro N° 11).

5.2.2.2 Dimensiones del tamaño del bulbo

En un inicio el movimiento del agua fue rápido, pero a medida transcurría el tiempo el avance del frente de mojado se fue volviendo más lento, sin llegar a un punto de equilibrio, este fenómeno es explicado por Baver (4), quien sostiene que el movimiento del agua en el suelo en condiciones de no saturación varía con el tiempo y de un punto a otro del sistema, además asegura que la rapidez de frente de mojado se hace notablemente más lenta con el tiempo.

En relación a la forma de los bulbos, cabe mencionar que a pesar de la diferencia de textura y del tiempo que requirió en cada uno de los suelos para alcanzar un diámetro de consideración, su

forma fue muy similar, tendiendo a conservar su distancia al frente de mojado en todas las direcciones, lo cual es notorio en los anexos A-19 y A-20. Este fenómeno se puede explicar a través del análisis de dos factores:

El primero es que en la interfase cerámica porosa-suelo, el contenido de humedad es elevado, de manera que esto permite que en la porción de suelo adyacente a la cápsula, tenga lugar un hinchamiento paulatino de los coloides de arcilla, lo cual según Buckman y Brady (7), constituye uno de los principales mecanismos por el cual se complica la percolación del agua a través de los suelos, obstruyendo los pequeños canales comunicantes y aun los microporos más grandes del suelo. Es necesario aclarar que en el presente estudio no se puede hacer referencia al término de percolación propiamente dicho, ya que el movimiento del agua no responde a un flujo masivo (a pesar de que los suelos no poseían su estado natural), pero si el hinchamiento de las arcillas interviene en cualquier caso. El fenómeno en mención puede confirmarse en el estudio, al analizar el comportamiento del gasto de agua en las diferentes texturas de suelos, teniendo que para un mismo tiempo, el gasto de agua disminuye a medida que la fracción de arcilla va siendo más dominante, por ejemplo, un volumen de 10 litros sería consumido por un suelo arenoso en un tiempo de 15.27 horas, un franco limoso lo haría en 29.5 horas y un franco arcillo limoso en 65.56 horas. Además, si se considera que el caudal nominal usado en esta evaluación era de 5 litros por día, se puede apreciar que para el caso del suelo franco arcillo limoso, el caudal promedio liberado fue de 3.39 litros por día, lo cual indica que el suelo adyacente a la cápsula redujo en cierta manera el movimiento del agua debido al efecto antes mencionado. En el suelo franco limoso se presentó una condición bastante similar, al obtener caudales promedio de 7.73 litros por día, lo cual es un poco mayor que el caudal nominal. Para el suelo franco arenoso este efecto se vio disminuido,

obteniéndose un caudal promedio de 13.44 litros por día, lo cual es superior al caudal nominal y es debido a la mayor facilidad con la que el agua fluye por este suelo.

Un segundo factor es la diferencia de potencial establecida entre el frente húmedo y el suelo circundante. Al tomar de referencia el contenido de humedad inicial de los suelos y el contenido de humedad en las partes más distantes del bulbo se tiene para el suelo franco arenoso con $\theta_{wi} = 8.51\%$, y un $\theta_w = 17.37\%$ en el bulbo, se tiene una diferencia de potencial de 28.7 atmósferas (según las curvas de retención de humedad), para el suelo franco limoso se tiene un $\theta_{wi} = 11.65\%$ y θ_w del bulbo de 17.04%, para una diferencia de 10.14 atmósferas, y para el suelo franco arcillo limoso el $\theta_{wi} = 15\%$, con θ_w del bulbo de 20.54%, mostrando una diferencia de potencial de 13.24 atmósferas. Esto explica en parte el porqué en el suelo arenoso el agua se movió con mayor rapidez.

La diferencia de potencial antes analizada, permite que el agua fluya desde la cápsula hasta los extremos del bulbo de humedecimiento, evitando que se forme un exceso de humedad en el bulbo, pues de ocurrir una zona de saturación, ésta provocaría un flujo forzado por la acción de la gravedad, situación que no se presentó en el ensayo; de esta manera y de acuerdo a Baver (4), el gradiente gravitatorio puede ser despreciable, pues en comparación con el gradiente matricial, no es significativo y por lo tanto puede omitirse para efectos de análisis.

5.3 Evaluación económica

El costo para la elaboración de cápsulas porosas de arcilla está determinado principalmente por el costo de la materia prima, siendo su principal componente la arcilla de loza, el que representa el 50.35% del total del costo. El componente de la quema o cochura, representa el

19.50% del costo total, y la depreciación del equipo y materiales (otros costos), representa el 15.60%; la mano de obra contribuye con un 8.86%.

Estos costos se han calculado tomando en cuenta una producción en serie de las cápsulas, con lo cual se tendría un costo por cápsula de ₡2.82, sin tomar en consideración el beneficio que se podría obtener al ser ésta comercializada.

6. CONCLUSIONES

- * La forma más adecuada para el diseño de cápsulas porosas de arcilla con fines de irrigación es la ovoide, la cual es fácilmente reproducible con un molde de dos piezas, presenta facilidad para el desmoldado y principalmente no presenta problemas de cuarteamiento en las cápsulas debido a que esta forma hace una mejor distribución de las fuerzas de contracción que se producen en las paredes, a raíz de la pérdida de humedad en el secado.
- * El método más apropiado para la construcción de las cápsulas es el de colada con barbotina en moldes de yeso, con el cual se obtienen cápsulas de una sola pieza y con buena uniformidad tanto externa como interna, facilitando además la producción en serie del proceso.
- * La temperatura de quema de las cápsulas, de 850 °C, dio como resultado una buena porosidad y una resistencia estructural aceptable a éstas, usando la proporción de 100:0, con la cual presentaron buenas liberaciones de agua.
- * El tamaño de las cápsulas de forma ovoide, utilizada en el presente estudio se considera adecuado, tanto desde el punto de vista de su construcción, como para fines de irrigación.
- * La arcilla de loza constituye una buena alternativa para la construcción de cápsulas porosas, dado que posee una buena porosidad, aun sin la adición de aditivos utilizados para este fin.

- * El aserrín de madera de pino estandarizado, constituye un material que proporciona una porosidad bastante aceptable a la arcilla de loza, la cual es el resultado de la combustión de dicho material en el momento de la cochura de las cápsulas.
- * El agua liberada por las cápsulas, es función tanto de las cargas hidrostáticas aplicadas como de la porosidad de las cápsulas, respondiendo el caudal en forma proporcional a los cambios experimentados por estas dos variables.
- * El sistema planteado funciona con dos tipos de movimiento del agua, es decir por flujo saturado y por el no saturado. El primero se establece por la carga hidráulica aplicada, mediante el flujo que se establece a través de las paredes de la cápsula. El segundo debido a la acción del potencial de matriz del suelo, llamado comúnmente succión.
- * De las proporciones de mezclas evaluadas, se considera como la mejor la de 100:0, o sea la mezcla que no contiene aditivo, dado que con presiones hidrostática de 0.25 m, se puede obtener liberaciones de 3.28 litros por día, hasta 13.56 litros por día, con carga de 1.0 m.
- * El movimiento del agua en el bulbo de humedecimiento se da bajo condiciones de flujo no saturado, en el cual tiene una gran influencia la diferencia de potencial establecida entre la humedad del bulbo y la del suelo circundante.
- * La formación del bulbo de humedecimiento acontece con mayor rapidez en suelos franco arenosos que en los suelos arcillosos, dado que los suelos livianos tienen estrechos límites de

retención de agua fácilmente aprovechable, pudiendo conseguir un ajuste más rápido de la diferencia de potenciales entre un punto y otro, en comparación con los suelos de textura media y pesada.

- * El inchamiento de las arcillas que componen los suelos, constituye una causa de disminución en el caudal liberado por las cápsulas cuando éstas son enterradas, comparado con el caudal que podrían liberar en un medio acuoso, bajo la misma carga hidráulica.
- * El fenómeno del desarrollo del bulbo de humedecimiento en el riego con cápsulas porosas de arcilla, con uso de cargas hidrostática positivas, puede ser descrito mediante la aplicación de un modelo matemático de predicción de tipo cuadrático semilogarítmico, donde $y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_1^2$, con $x_1 = \text{Log } x$, siendo y la distancia del centro de la cápsula al frente de humedecimiento y x el tiempo.
- * En la formación del bulbo de humedecimiento no se presentó el fenómeno de la percolación causada por el movimiento gravitacional del agua, por lo que, con el uso de este método de riego se podría lograr una disminución en la pérdida de nutrientes por lixiviación.
- * Dentro del costo de producción de las cápsulas porosas de arcilla, el principal componente lo constituye el costo de la materia prima, luego se tiene el costo de la quema, que al sumarlos representan un 69.85% del costo total.

* En las formas geométricas que no dieron resultado dentro del diseño de la cápsula se encuentran: el cono truncado, cilindro y esfera.

7. RECOMENDACIONES

- **Para posteriores investigaciones sobre el método se recomienda utilizar la forma de ovoide en la fabricación de las cápsulas, haciendo uso de arcilla de loza como materia prima y utilizando el método de colada con barbotina en moldes de yeso.**
- **Para la construcción de las cápsulas no es necesario utilizar aditivos para darle porosidad, dado que con una quema de 850 °C se puede obtener una buena porosidad, que permita caudales entre 3.28 y 13.56 litros por día, con la aplicación de cargas hidráulicas entre 0.25 a 1.0 m.**
- **Para obtener una buena uniformidad tanto en el tamaño, estructura y porosidad de las cápsulas, deben utilizarse materiales estandarizados y de buena calidad.**
- **Se deben realizar futuras investigaciones sobre la temperatura de cocción de las cápsulas para determinar el comportamiento de la porosidad y la resistencia mecánica de la arcilla de loza.**
- **Las protuberancias que sirven para la interconexión de las cápsulas deberán ser vidriadas a fin de facilitar la operación de entubado, y mejorar la resistencia estructural de éstas.**
- **Para lograr una disminución en las pérdidas de evaporación directa en la superficie del suelo, se tendrá que considerar la profundidad de instalación de la cápsula, tratando de minimizar el área superficial humedecida, tomando en cuenta a su vez los costos en que se incurriría.**

- Para trabajos posteriores sobre el tema se recomienda que quien realice la investigación, de ser posible elabore las cápsulas porosas, o mantenga una supervisión constante en el proceso de fabricación de éstas, ya que los ceramistas del medio tradicionalmente se dedican a la elaboración de piezas artísticas, desconociendo la importancia que juega el espesor y la porosidad de las cápsulas para fines de riego, además éstos por costumbre elaboran piezas cerámicas de buen aspecto externo, pero con grosores irregulares en sus partes internas.
- Llevar a cabo estudios sobre la vida útil de la cápsula.
- Ensayar con cápsulas de un menor tamaño, tomando en cuenta los valores de permeabilidad a fin de disminuir los costos de producción de éstas.
- El sistema de riego por cápsulas porosa de arcilla podrá ser utilizado a nivel de invernadero y con cultivos bajo techo de buena rentabilidad, no recomendándose para cultivos de alta densidad por el elevado costo que resultaría dicho sistema, por la alta densidad de cápsulas por unidad de superficie y por el costo de las mismas.

8. BIBLIOGRAFIA

1. AGUILAR, C.E. 1975. Informe geológico del Campo Experimental de la Facultad de Ciencias Agronómicas, ubicado en jurisdicción de San Luis Talpa, Depto. de La Paz. San Salvador, El Sal. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador. p. 4-5.
2. ALEMAN ORTEGA, S.R.; BAIRES PEREZ, C.R.; HERNANDEZ ORELLANA, C.A.; MENA GARCIA, O.E. 1989. Evaluación de los bulbos de humedecimiento con fines de generar datos preliminares para el diseño de sistemas de riego por goteo. tesis Ing. Agr. San Salvador, Universidad de El Salvador, Fac. de Ciencias Agronómicas. 118 p.
3. BAQUEDANO MUÑOS, M. 1989. Cuadernos populares; ¿Que son las tecnologías apropiadas?. Valparaiso, Chile, CETAL. 29 p.
4. BAVER, L. D. 1973. Física de suelos. Trad. por Jorge Manuel Rodríguez. México, D. F., UTEHA. p. 335-371.
5. BERLIJN, J.D. ; BROUWER, C. 1990. Riego y drenaje. 2ª ed. Mexico, D.F., Trillas. 100 p.
(Manuales para la educación agropecuaria no. 35)

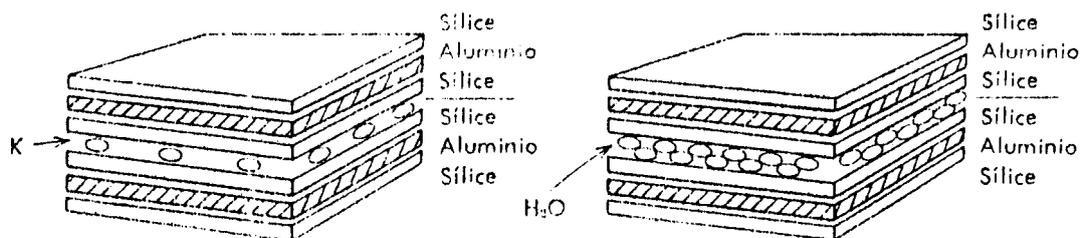
6. BONILLA LARA, H.A. ; MURILLO VILLANUEVA, O.A.. 1992. Evaluación de sistemas de riego por goteo y microaspersión no convencionales en pepino (Cucumis sativus) en San Luis Talpa, La Paz. Tesis Ing. Agr. San Salvador, Universidad de El Salvador, Fac. de Ciencias Agronómicas. 167 p.
7. BUCKMAN, H. O.; BRADY, N. C. 1966. Naturaleza y propiedades de los suelos. Trad. por Salord Barceló. Barcelona, España, UTEHA. p. 169-196.
8. CLARK, K. 1976. Cerámica torneada. Trad, por Viviana S. de Ghio. Buenos Aires, Argentina, KAPELUSZ. 87 p. (Colección Cómo Hacer)
9. CONFERENCIA SOBRE RELACIONES PLANTA-AGUA-SUELO. (San Salvador). s.f..
Relación: planta-agua-suelo. s.n.t. San Salvador, El Sal., s.n. 4 p.
10. ESTADOS UNIDOS. DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA. SERVICIO DE CONSERVACIÓN DE SUELOS. 1972. Relación entre suelo-planta-agua. Trad, por Emilio Avila de la Torre. México, D.F., Diana. 99 p. (Colección Ingeniería de Suelos no.15)
11. GAVANDE, S.A. 1972. Física de suelos; principio y aplicaciones. México, D.F., Limusa. p. 335 p.

12. HANKS, R. J.; ASHCROFT, G.L. 1983. Física de suelos aplicada. Trad. por Hector M. Malano. Utha, EE.U.U., Centro Internacional de Riegos. 54 p.
13. HERNÁNDEZ SAUCEDO, F.R. ; VALLE FLORENCIA, H. DEL. 1979. Producción de lechuga (Lactusa sativa) utilizando riego por succión en la zona de Chapingo, México. Nueva Epoca (Méx) no. 15:34-45.
14. KRAMER, P. J. 1989. Relaciones hídricas de suelos y plantas. una síntesis moderna. Trad. por Leonor Tejada. México, D. F., HARLA. 538 p.
15. LEITHOLD, L. 1982. EL Cálculo con geometría analítica. Trad. por José Carlos Escobar H. 4ª Ed. México, D. F., HARLA. p. 27, 274-277, 780.
16. LUTHIN, J. N. 1990. Drenaje de tierras agrícolas. teoría y aplicaciones. Trad. por Alonso Blackaller V. México, D. F., LIMUSA. 684 p.
17. NEUGEBAUER, B. 1993. Agri-Cultura ecológicamente apropiada. manual de metodología para la promoción de una agri-cultura ecológica. Peibenberg, Alemania, Fundación Alemana para el Desarrollo Internacional. 159 p.
18. NOI, Y. 1967. Relaciones suelo:agua. Israel, Servicio de Extensión Agrícola - Israel. Departamento de Capacitación para el Extranjero. 39 p.

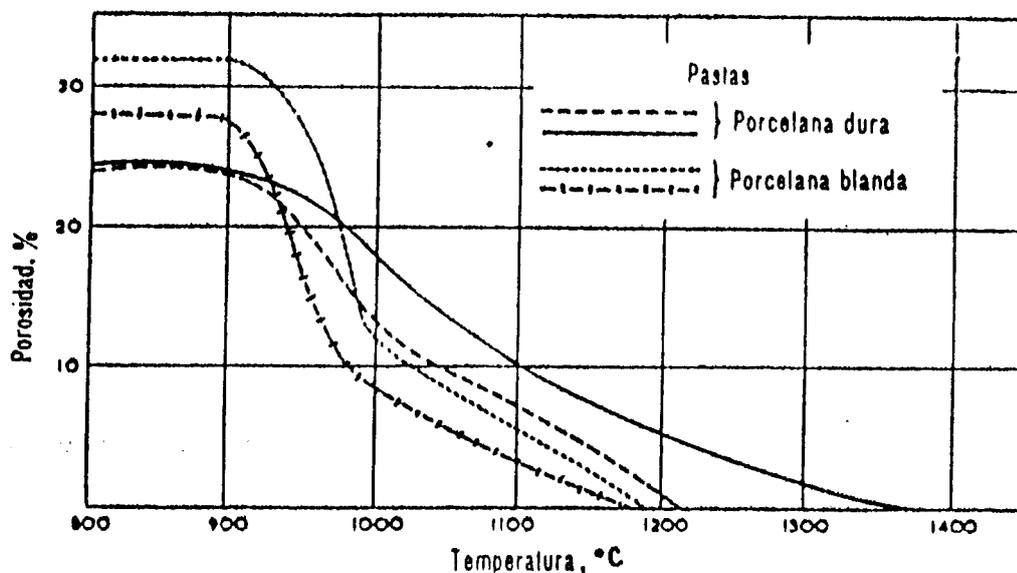
19. PALACIOS VELEZ, E. 1963. Cuanto, cuando y como regar. México, D. F., Secretaría de Recursos Hidráulicos. Dirección General de Distritos de Riego. 138 p.
20. ROSENTAL, M. M.; LUDIN, P. F. 1971. Diccionario filosófico. San Salvador, El Salvador, Universitaria. 86-87 p.
21. SERVICIOS MULTIPLES DE TECNOLOGIAS APROPIADAS. 1992. Evaluando la eficiencia de las vasijas porosas como sistema de riego de bajo costo en el altiplano boliviano. Agroecología y Desarrollo (EE.UU.) no.2/3:60.
22. SINGER, F.; SINGER S. S. 1971. Principios generales de la fabricación de cerámica. Trad. por Julián Domínguez S. Bilbao, España, URMO. 786 p. (Cerámica Industrial, Volumen I)
23. SILVA, D.A. DA; ARAUJO, J.V. DE; SOUZA SILVA, A. DE; RAJ GHEYI, R. 1985. Irrigação por cápsula porosa. I.Confecção de cápsulas e ensaios de liberação de água. Pesquisa Agropecuaria Brasileira (Bra.) 20(6):693-698.
24. SOUZA SILVA, A. DE; SILVA, A.D. DA; RAG GHEYI, R.; ROCHA PORTO, E. 1984. Viability of irrigation porous capsule method in arid and semi-arid regions. Pesquisa Agropecuaria Brasileira (Bra.) 19(10):1257-1265.

25. OFICINA REGIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGIA PARA AMERICA LATINA Y EL CARIBE. 1984. Boletín PRM; La transformación de los potes de barro. Word Water Español (Uru.) no. 2:33-34.
26. _____. 1983. Boletín PRM. Riego con potes de arcilla y cápsulas porosas. Word Water Español (Uru.):42-43.
27. _____. 1983. Boletín PRM. Procedimiento de transferencia de tecnología del PRM. Word Water Español (Uru.):37.
28. _____. 1986. Boletín PRM. Manual tecnológico para un área rural en Bolivia. Word Water Español (Uru.):24.
29. VALLE FLORENCIA, H. DEL. 1977. Experimento preliminar en invernadero, con riego por succión para el diseño de cápsulas porosas. Nueva Epoca (Méx) N° 7-8:39-53.

ANEXOS

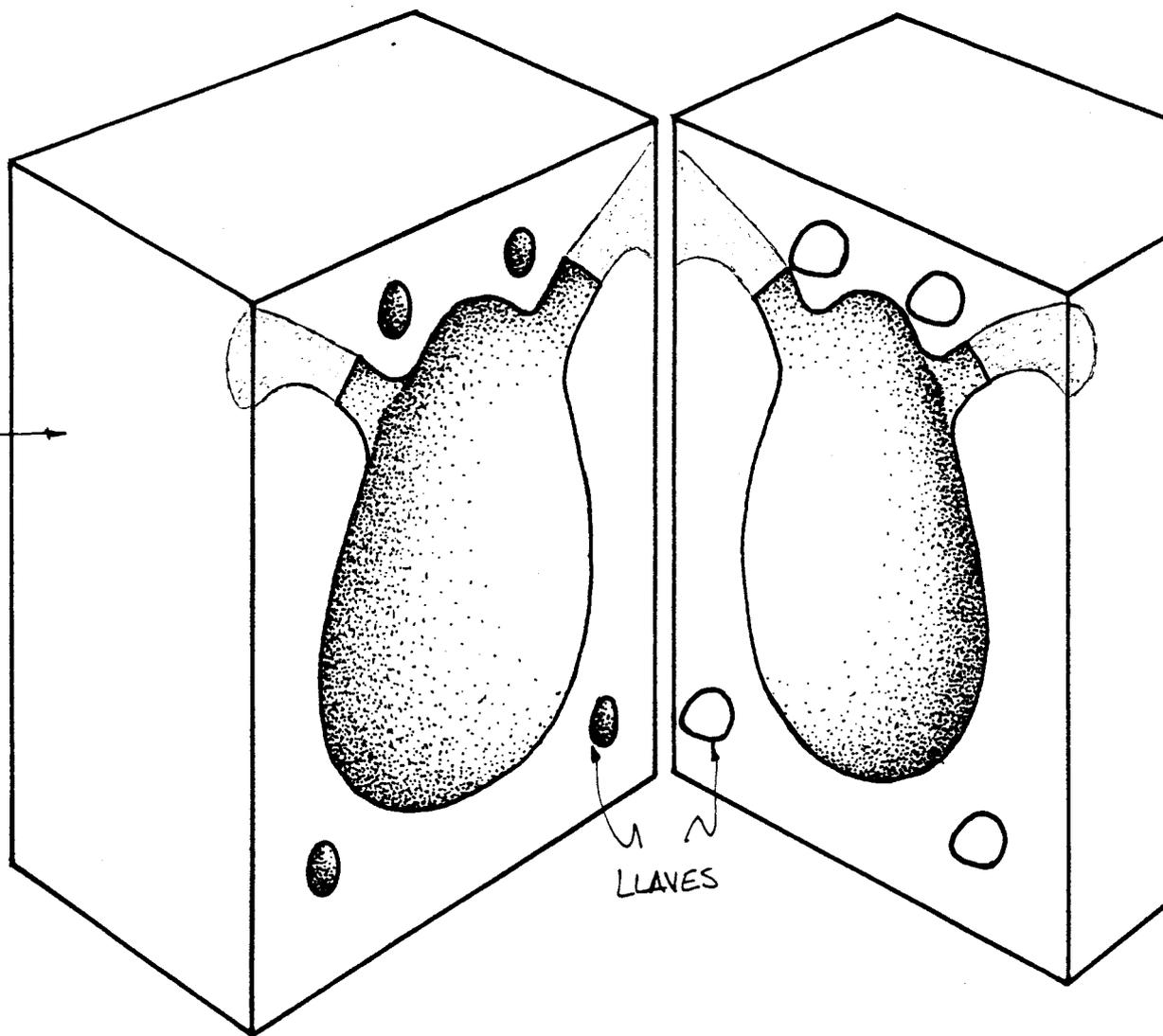


Anexo 1. Esquema que muestra el ordenamiento de las láminas de sílice y aluminio en cristales de Illita (izquierda) y Montmorrillonita (derecha).



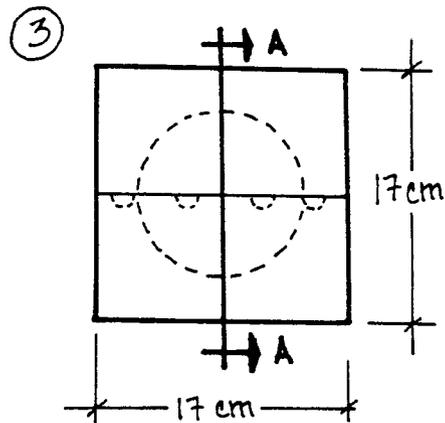
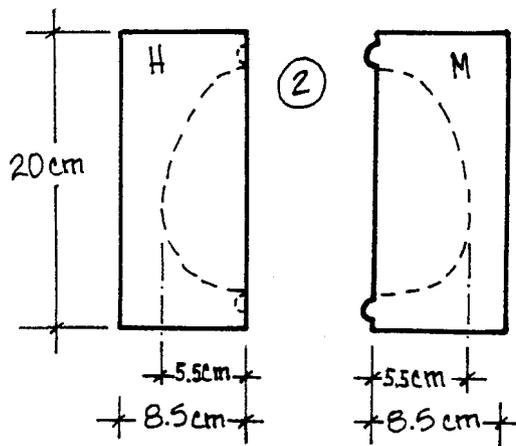
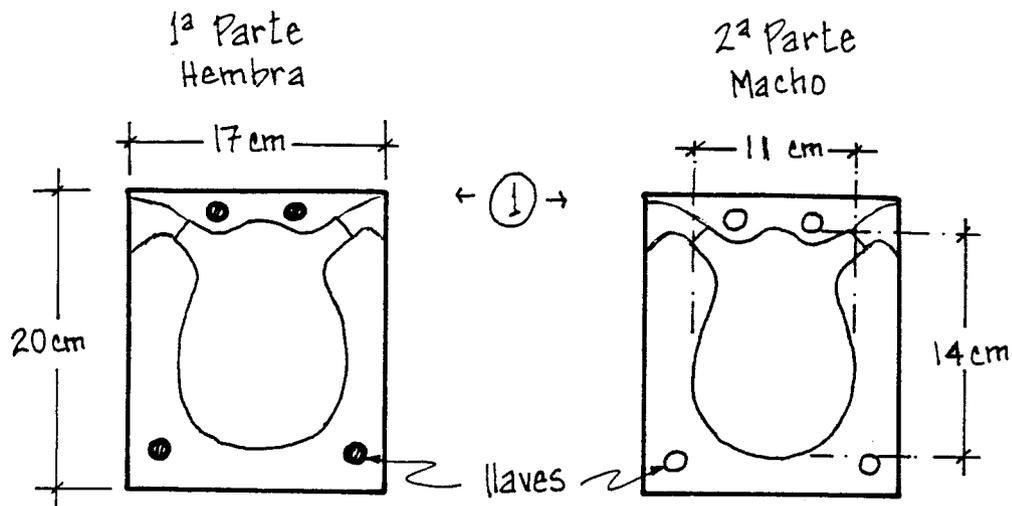
Anexo 2. Curvas de porosidad para diferentes materiales cerámicos. En estas curvas se puede observar que en el rango de 800 a 900 °C, la porosidad de los diferentes materiales se mantiene relativamente alta.

PARTE
HEMERA



143

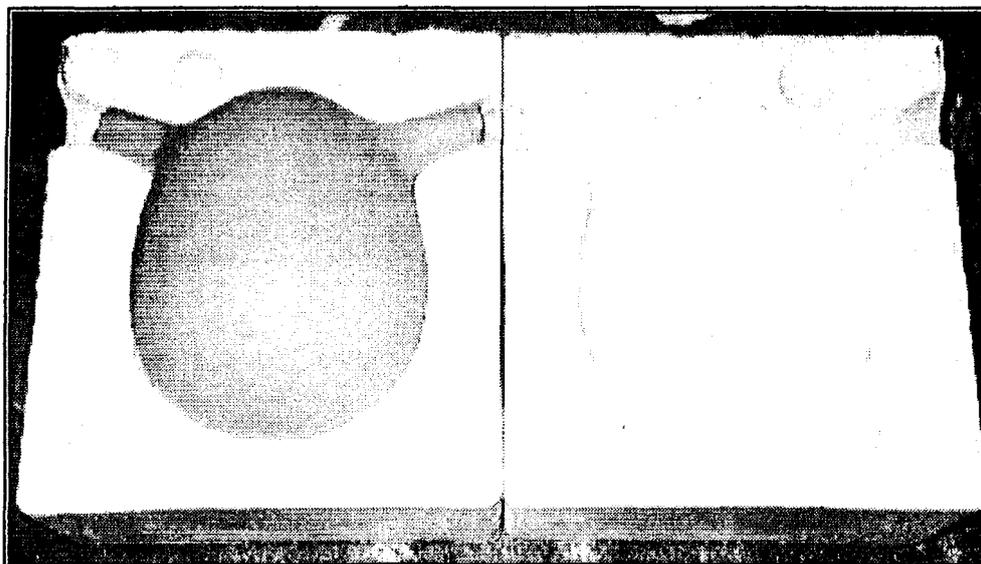
Anexo A-3. Esquema de las diferentes partes del molde de yeso de dos piezas, utilizado en la fabricación de ladrillos de arcilla porosa.



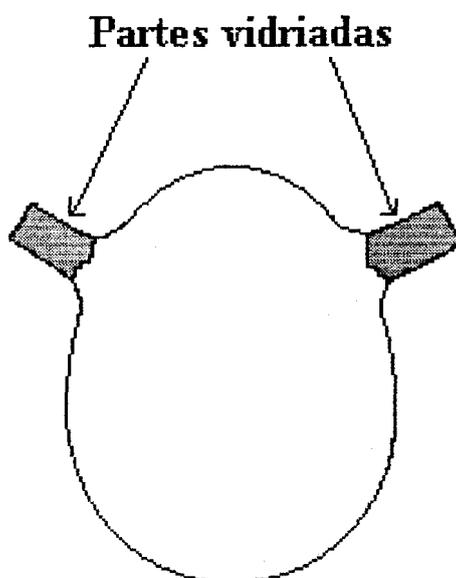
- ① Las dos partes vistas en su i
- ② Sección A-A. molde con sus
- ③ Vista superior dos partes
- ④ Cápsula por



Anexo A-4. Medidas del molde de yeso y de las cápsulas de arcilla elaboradas para el ensayo.



Anexo A-5. Desmoldado de cápsula. Se puede apreciar que el molde no presenta residuos de arcilla debido a la facilidad con que las piezas despegan del molde.



Anexo A-6. Esquema que muestra el vidriado de las protuberancias laterales para el entubado de las cápsulas.

ANEXO A-7. Metodología para la determinación del volumen y la superficie de un semielipsoide.

A continuación se describe de una manera muy breve los pasos seguidos en el cálculo de las ecuaciones de volumen y superficie del semielipsoide, a raíz de la inexistencia de fórmulas que resuelvan tal problema. Vale la pena hacer mención, que para la resolución de las integrales planteadas en el proceso se hizo uso del programa para computadoras DERIVE, el cual facilitó en gran medida los cálculos a realizar.

Si una elipse tiene su centro en el origen y su eje principal en el eje y , entonces la ecuación de la elipse es de la forma:

$$\frac{y^2}{a^2} + \frac{x^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

donde a es el valor del semieje menor y b el valor del semieje mayor, tomando en cuenta que $b > a$. Al despejar la ecuación (1) en términos de y se obtiene:

$$y = b/a \cdot \sqrt{a^2 - x^2} \quad (2)$$

Calculo de volúmenes

Para el caso de la estimación del volumen del semielipsoide, el cálculo de Leithold (15) plantea una solución a través de la siguiente ecuación :

$$V = 2 \cdot \pi \cdot \int_0^a x \cdot y \cdot dx \quad (3)$$

al sustituir y de la ecuación (2) en la ecuación (4) se tiene:

$$V = 2 \cdot \pi \cdot \int_0^a x \cdot (b/a \cdot \sqrt{a^2 - x^2}) \cdot dx \quad (4)$$

al derivar la función con respecto a x se obtiene la siguiente ecuación:

$$V = (2 \cdot \pi \cdot a^2 \cdot b) / 3 \quad (5)$$

esta es la fórmula del volumen del semielipsoide.

Para el volumen de la semiesfera se utiliza la ecuación siguiente (obtenida de tablas):

$$V = 2/3 \cdot \pi \cdot a^3 \quad (6)$$

con a como el valor del radio.

Cálculo de las superficies

Para el caso de la superficie del semielipsoide el análisis es diferente. A continuación se muestran los pasos seguir:

Retomando la ecuación (2) y considerando que $c = b/a$

se obtiene $y = c \cdot \sqrt{a^2 - x^2}$ (7)

al obtener la primera derivada de la ecuación (7) se obtiene:

$$y' = - \frac{c \cdot x}{\sqrt{(a^2 - x^2)}} \quad (8)$$

de acuerdo a los métodos propuestos en el cálculo, se reemplaza la primera derivada de la función (ecuación 8) en la fórmula de integración que dará como resultado el valor de la superficie que se forma al rotar la función de la elipse, alrededor del eje y.

$$S = \int_0^a x \cdot \sqrt{(1 + |y'|^2)} \cdot dx \quad (9)$$

donde 0 y a son los límites de integración de la ecuación.

Al resolver este integral se obtiene la ecuación de la superficie del semielipsoide:

$$S = \frac{0.5 \cdot \pi^2 \cdot a^2 \cdot c^2}{\sqrt{(c^2 - 1)}} - \frac{\pi \cdot a^2 \cdot (c^2 \cdot \text{ATAN}(1 / \sqrt{(c^2 - 1)}) - \sqrt{(c^2 - 1)})}{\sqrt{(c^2 - 1)}} \quad (10)$$

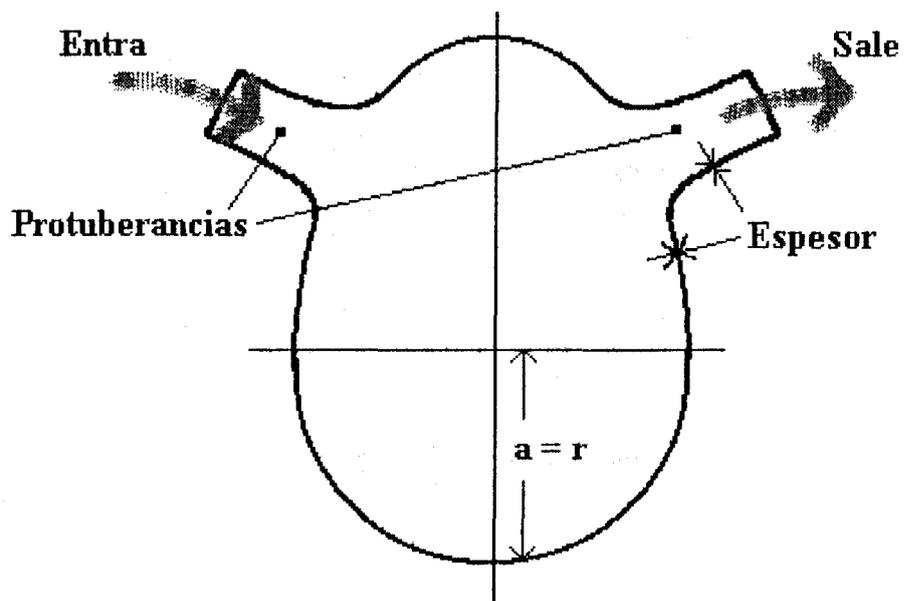
al sumar la superficie de la semiesfera se obtiene la superficie total del ovoide.

Para el cálculo del valor de la superficie de la semiesfera se emplea la siguiente ecuación:

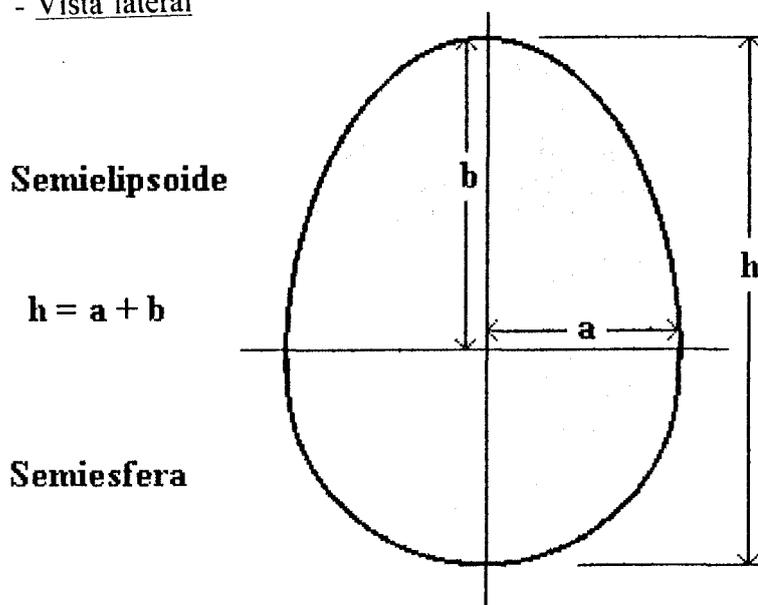
$$S = 2 \cdot \pi \cdot a^2 \quad (11)$$

donde a representa el valor del radio de la esfera.

- Vista frontal

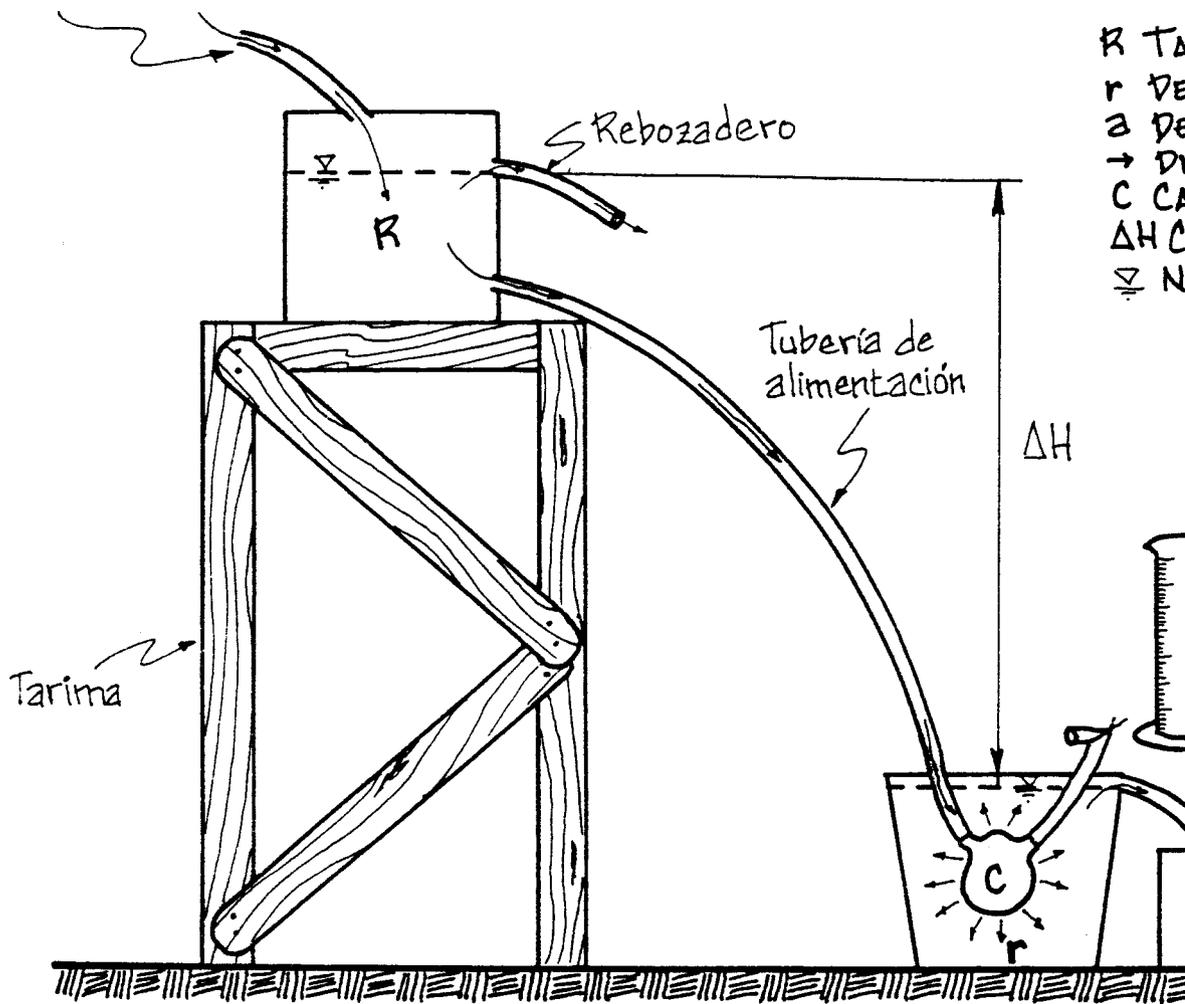


- Vista lateral



Anexo A-8. Esquema de la composición geométrica de la cápsula, y del flujo del agua, que en su concepción teórica está formada por un semi-elipsoide y una semiesfera. a o r: radio de la semiesfera y semieje menor del semi-elipsoide, b: semieje mayor del semi-elipsoide, h: altura de la cápsula.

Tubería de
entrada de agua

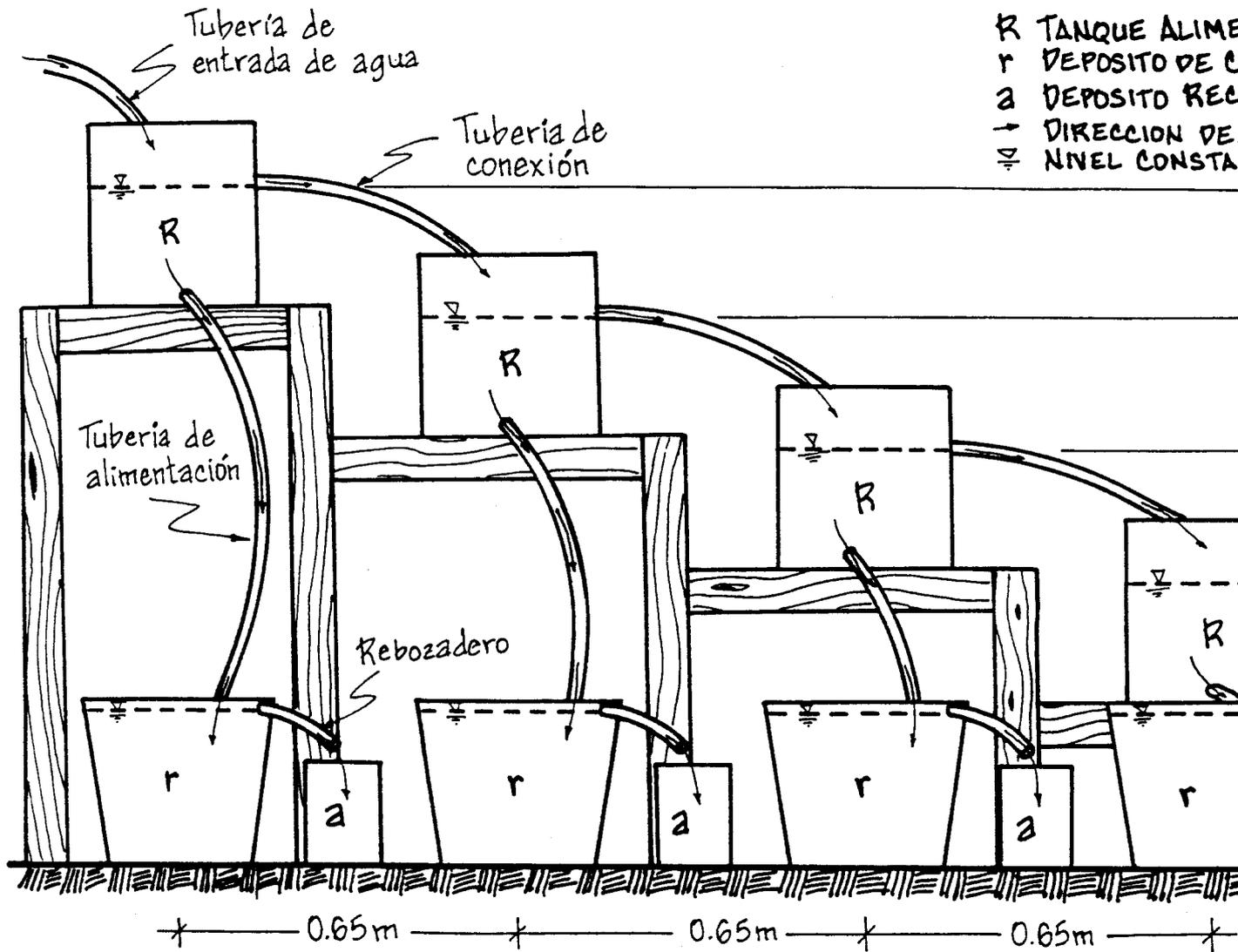


150

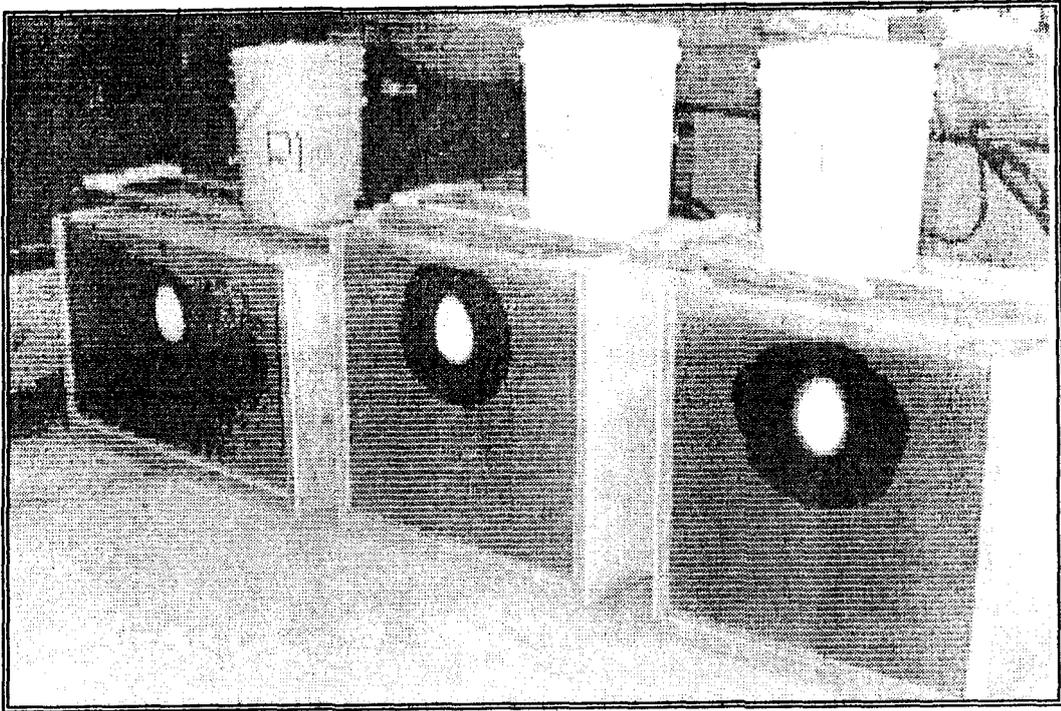
Anexo A-9. Esquema del permeámetro de nivel constante utilizado en las pruebas de liberación porosas de arcilla.

INDICADOR

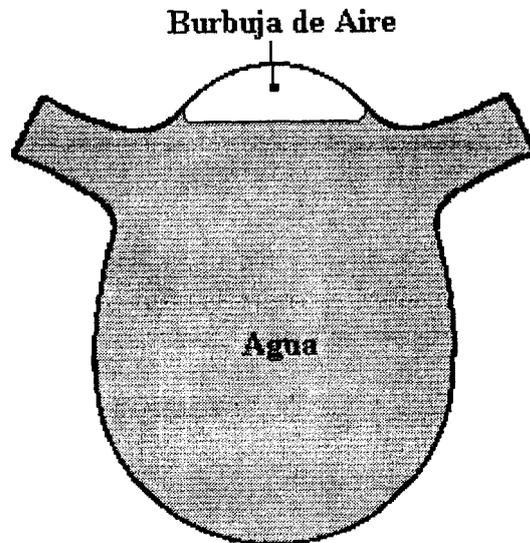
- R TANQUE ALIMENTACION
- r DEPOSITO DE C...
- a DEPOSITO REC...
- DIRECCION DE ...
- ≡ NIVEL CONSTA...



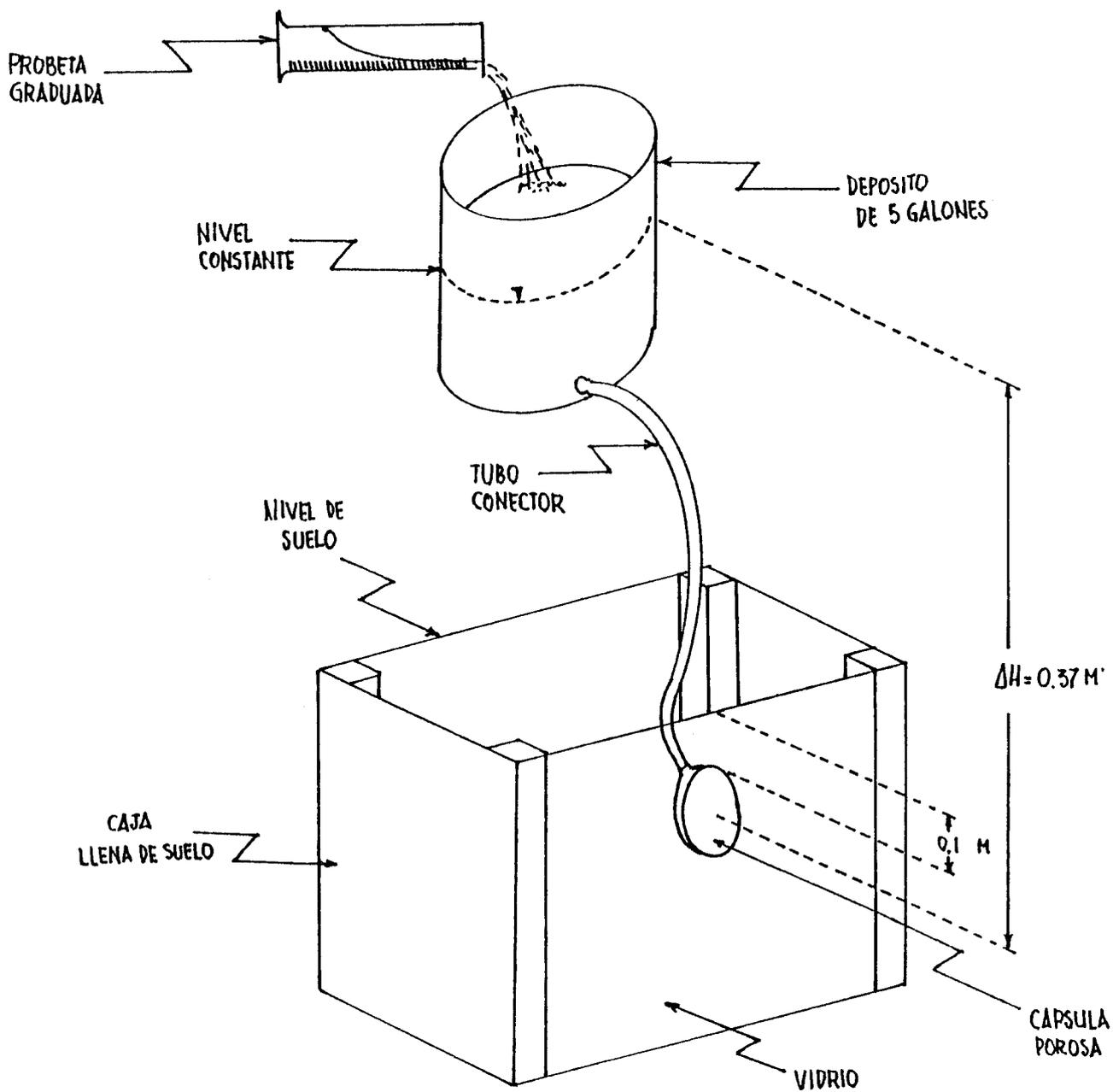
Anexo A-10. Esquema de la tarima de pruebas formada por cuatro permeámetros, con diferentes funcionamiento.



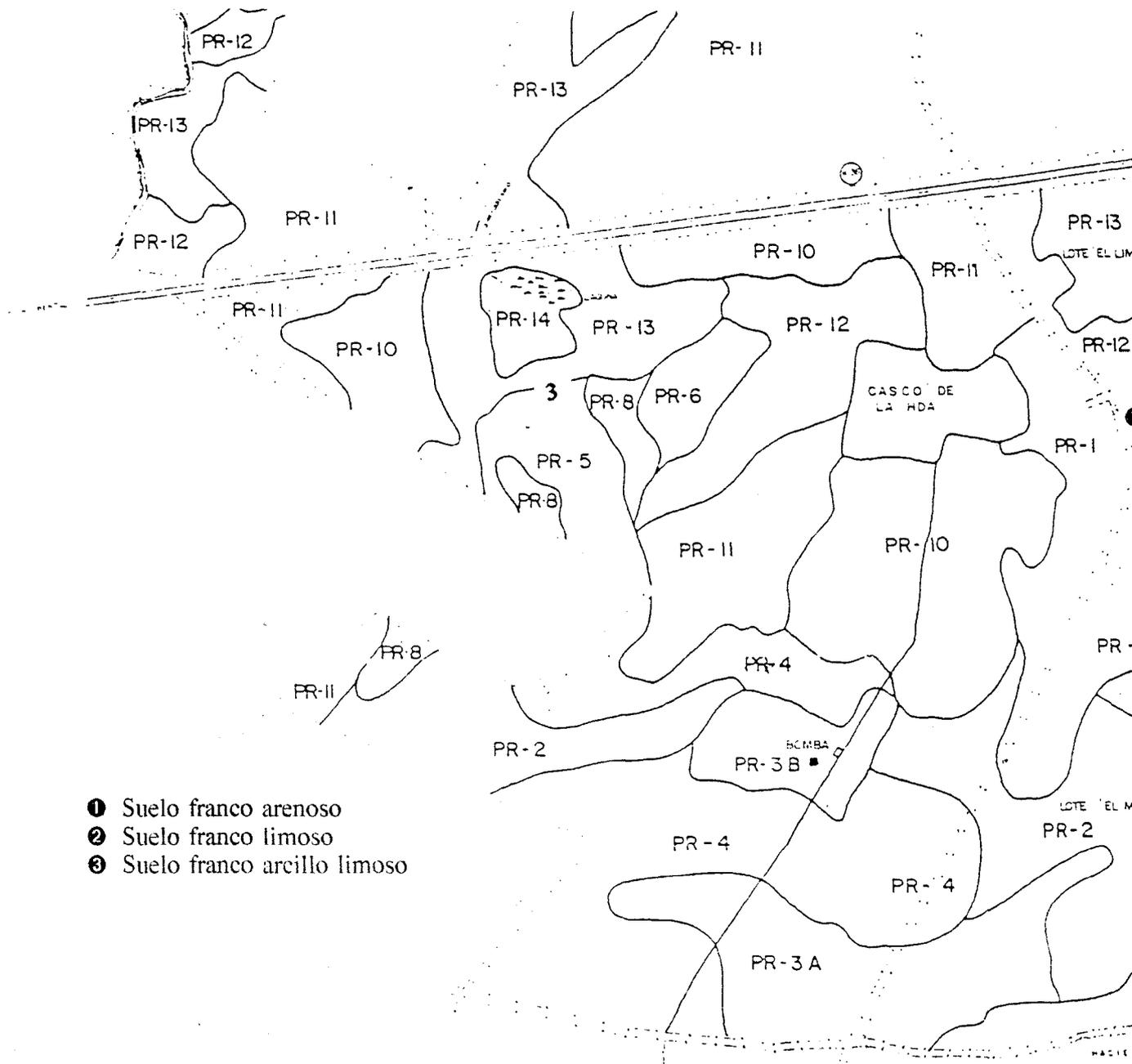
Anexo A-11. Montaje del ensayo mostrando las diferentes cajas de prueba de la repetición 1, con las tres texturas de suelo. De izquierda a derecha: FCL, FL y FA.



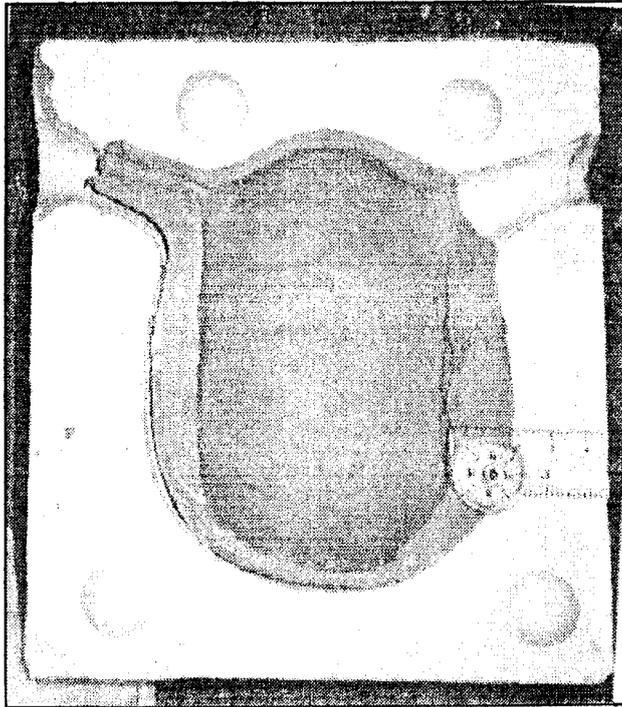
Anexo A-12. Esquema de la formación de burbuja de aire al interior de la cápsula porosa.



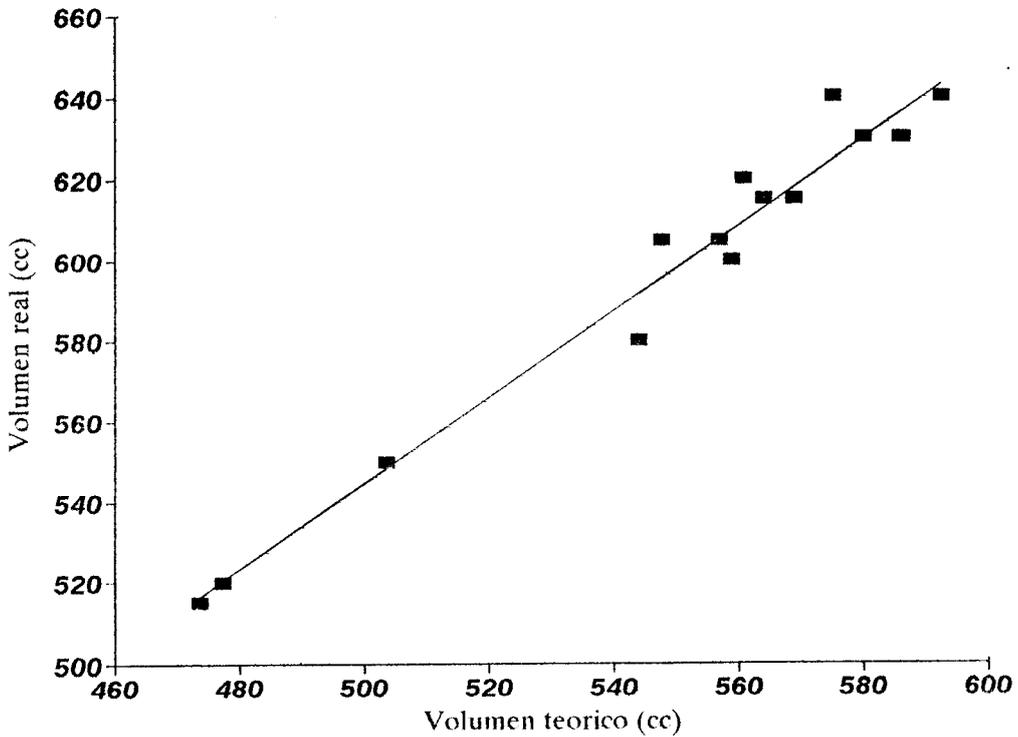
Anexo A-13 Esquema del sistema utilizado para la evaluación de los bulbos de humedecimiento, en el cual se empleó el modelo de la semicápsula pegada a un vidrio, para observar directamente el fenómeno.



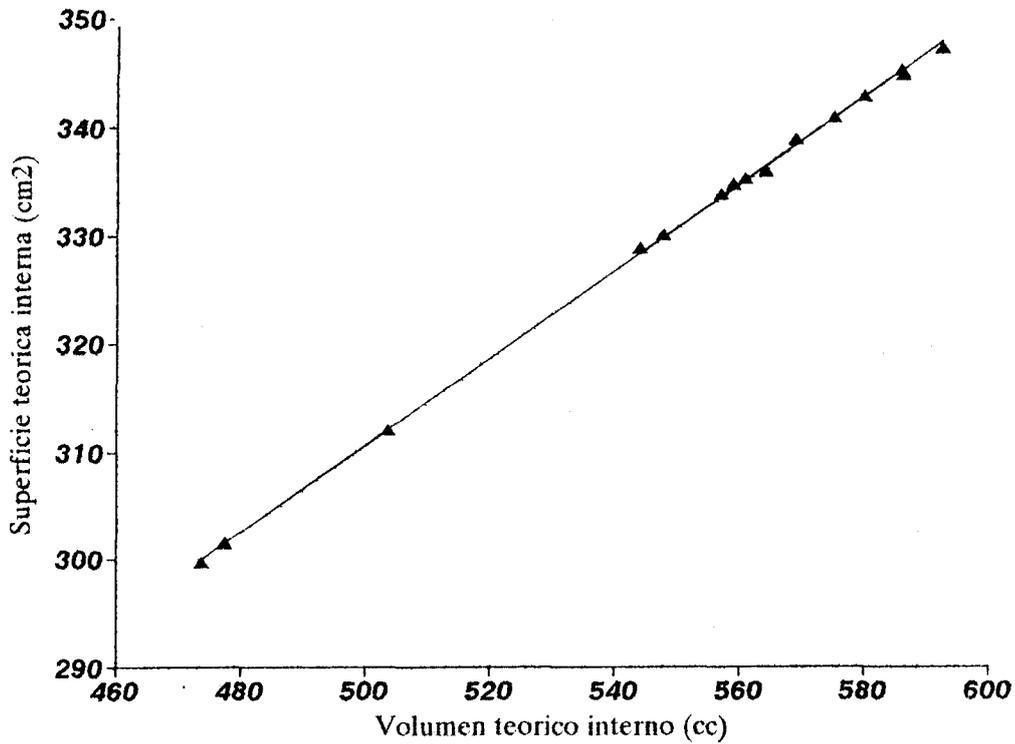
Anexo A-14. Ubicación de los puntos del Campo Experimental y de Prácticas de la Facultad, donde se utilizaron tipos de suelos para la evaluación del bulbo de humedecimiento.



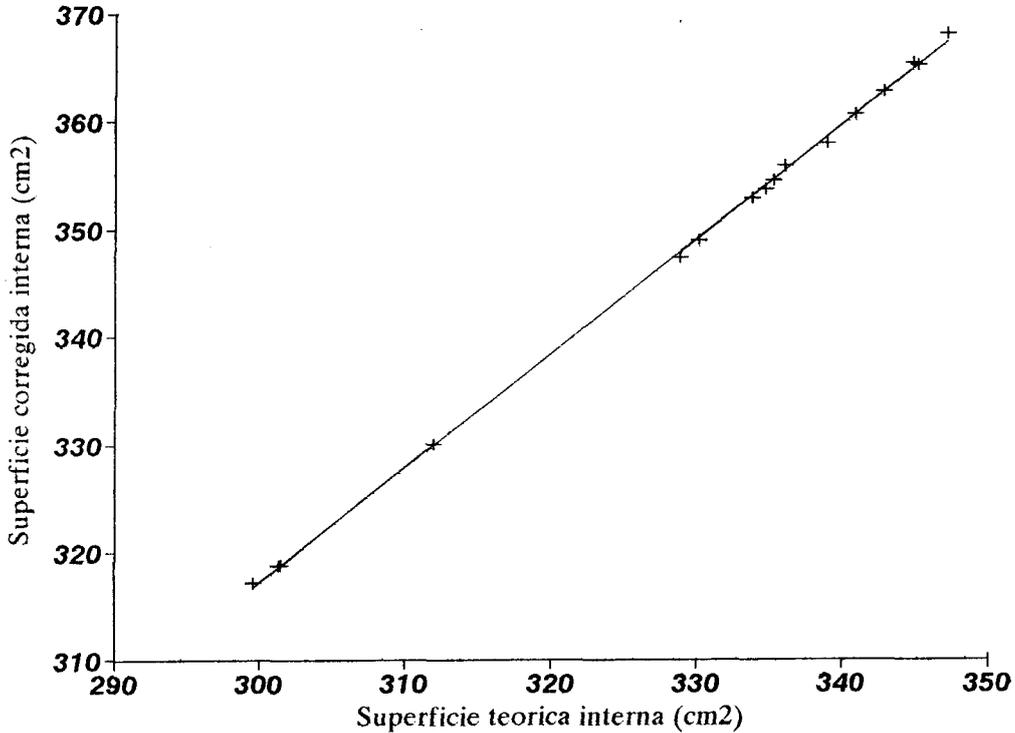
Anexo A-15. Desuniformidad en la pared de las cápsulas debido a la sedimentación del carbonato de calcio, usado como aditivo en la mezcla.



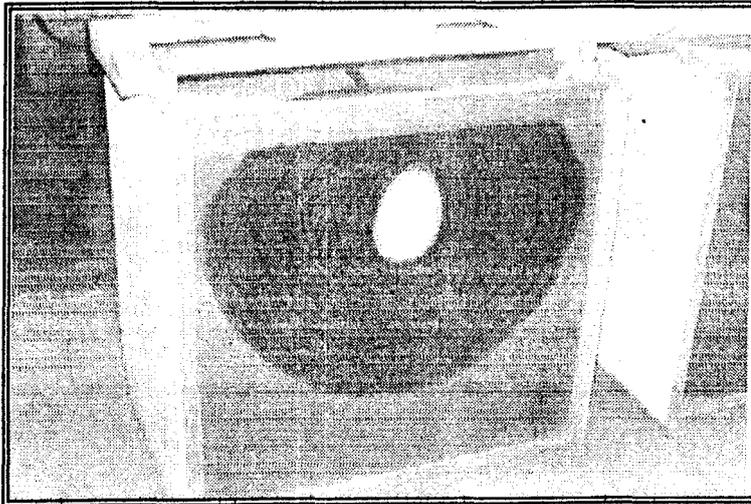
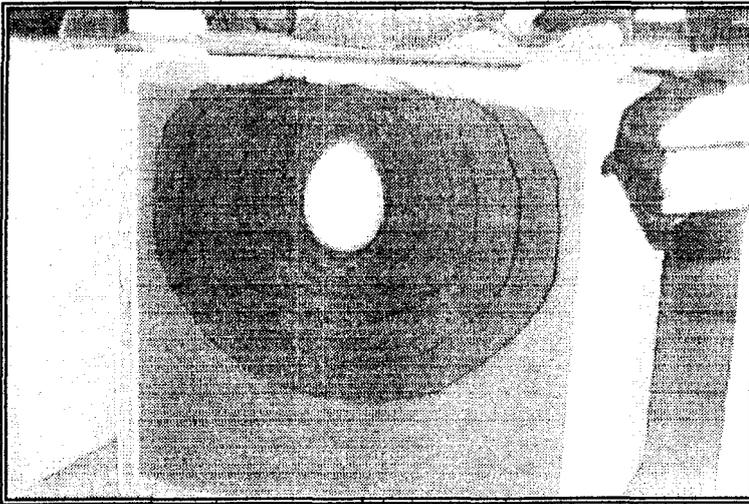
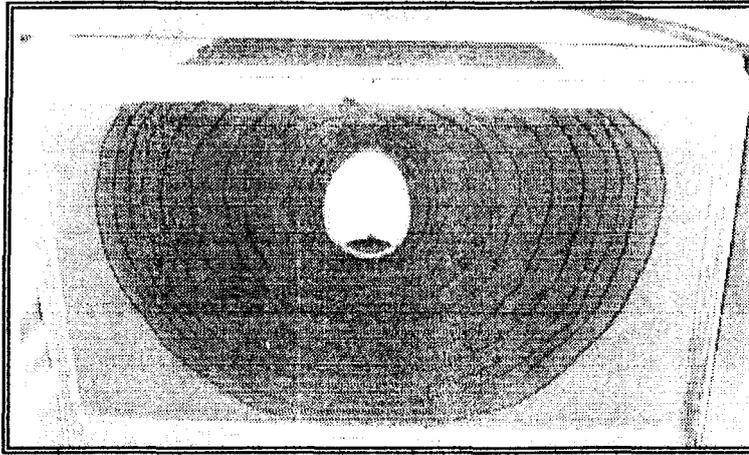
Anexo A-16. Gráfica que muestra la correlación entre el volumen teórico generado con la ecuación 3.1 y el volumen medido (real) de las cápsulas.



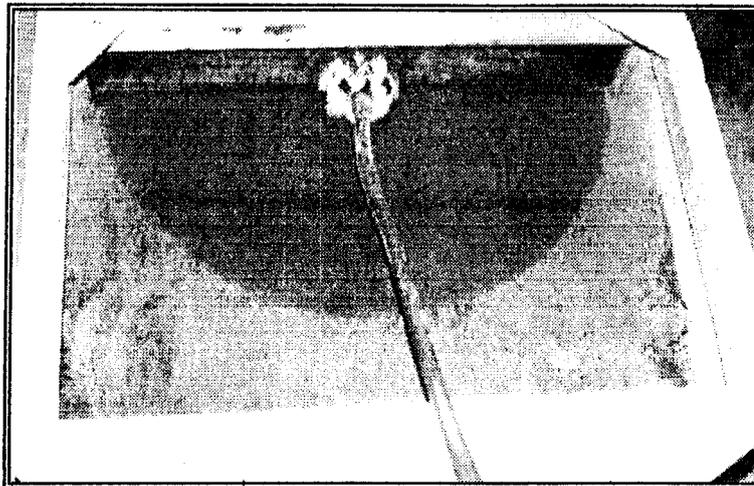
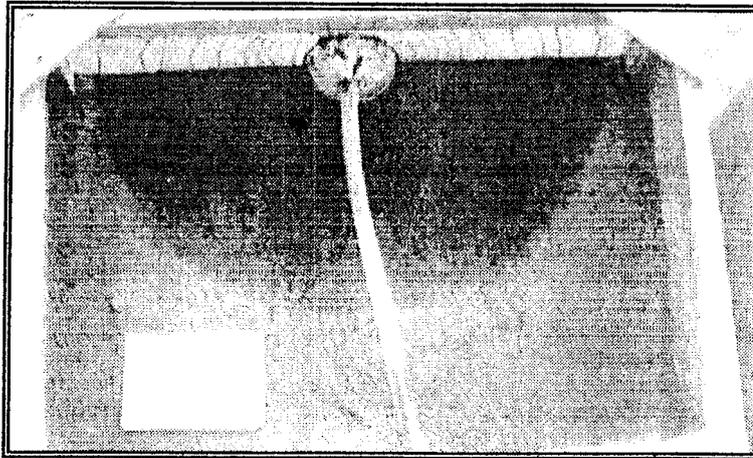
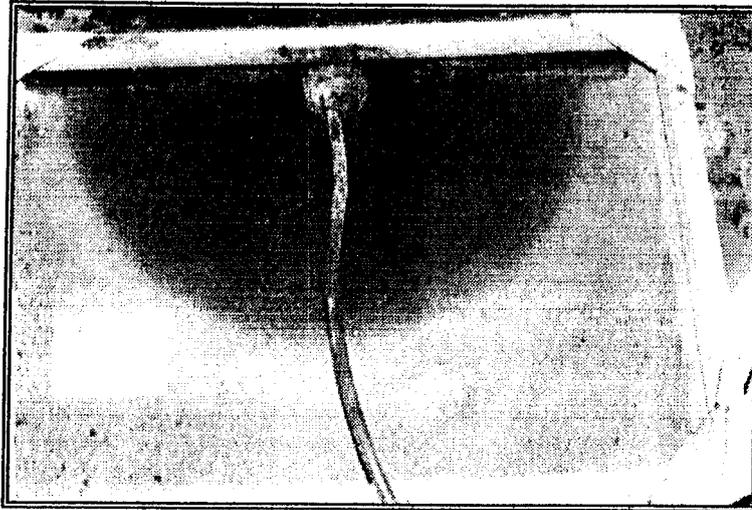
Anexo A-17. Gráfica que muestra la correlación entre el volumen teórico interno generado con la ecuación 3.1 y la superficie teórica interna generada con la ecuación 3.4, para las cápsulas.



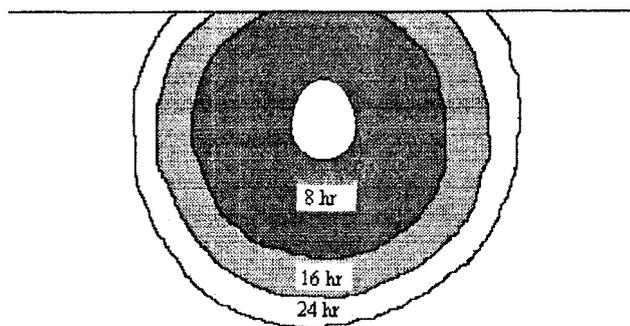
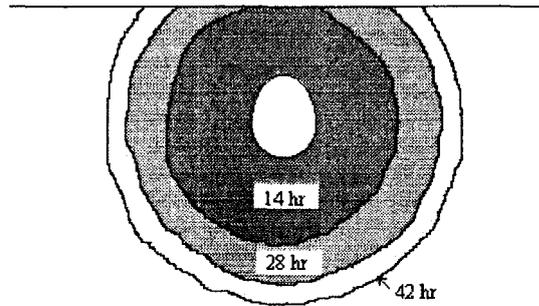
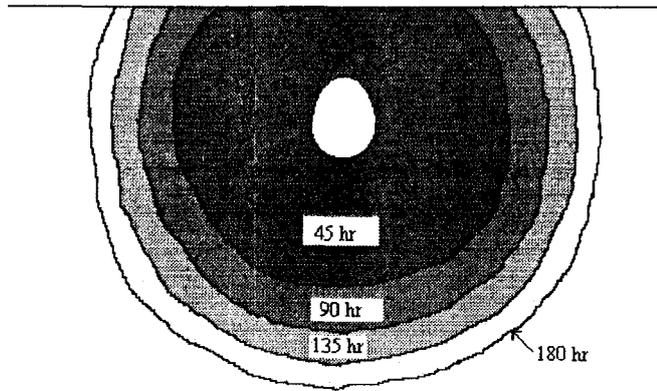
Anexo A-18. Gráfica que muestra la correlación entre la superficie teórica interna y la superficie corregida interna de las cápsulas.



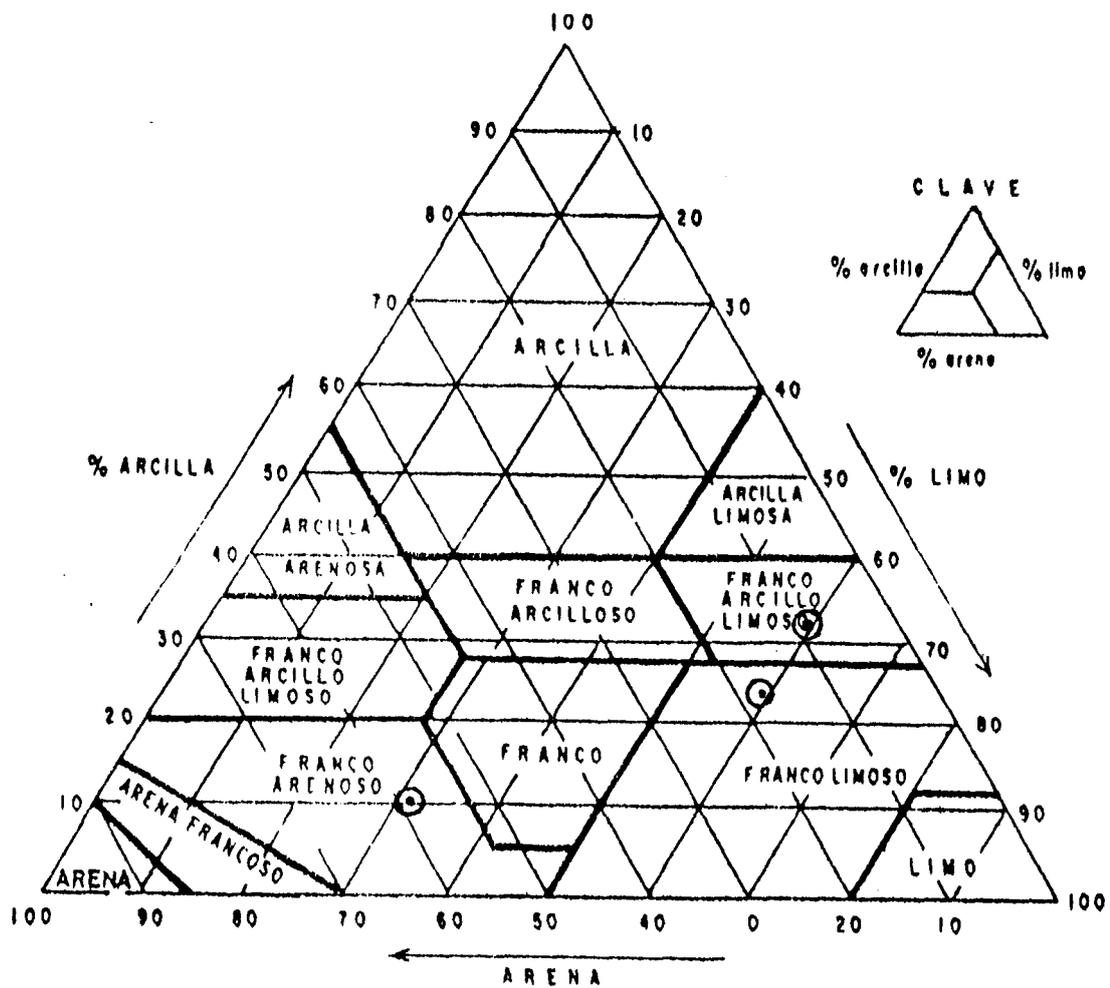
Anexo A-19 Bulbos de humedecimiento vistos frontalmente. Se puede apreciar la forma bastante semejante de los bulbos en las diferentes texturas y en diferentes tiempos. De arriba a abajo: FCL (187.1 h), FL (42.7 h) y FA (27.6 h).



Anexo A- 20 Bulbos de humedecimiento vistos en planta (parte superior de las cajas de prueba), luego de haber escarbado una franja de suelo hasta la profundidad de la cápsula (parte media). De arriba hacia abajo: FCL., FL y FA.



Anexo A-21 Esquema del comportamiento bidimensional de los bulbos de humedecimiento con respecto al tiempo, en las diferentes texturas de suelo. De arriba hacia abajo: FCL, FL y FA.



Anexo A-22 Ubicación de las tres texturas de suelos en el triángulo textural, las cuales han sido empleadas en la evaluación del bulbo de humedecimiento.

GLOSARIO

ADITIVO: Material utilizado en pequeñas proporciones, el cual es mezclado a la barbotina, con la función de formar poros en las paredes de un cuerpo cerámico, cuando éste sea quemado a temperaturas de 850°C.

ARCILLA: Desde el punto de vista cerámico se trata de una tierra plástica grasa, blanda e impermeable, capaz de conservar indefinidamente - una vez seca - la forma que le sea dada. Su composición incluye en mayor proporción el silicato de alumina.

BARBOTINA: Se le llama al barro en forma líquida, y se prepara con agua y arcilla, la cual se corta en partes muy pequeñas y es sumergida dentro de una muy pequeña cantidad de agua hasta que alcance el grado de barro líquido. La barbotina suele utilizarse como pegamento en alfarería, permitiendo la unión de dos trozos de alfarería.

BENTONITA: Es una arcilla de origen volcánico, es grasa al tacto y posee la característica de aumentar de volumen con el agua de una 10 veces. Se emplea para aumentar la plasticidad de algunas pastas y barbotinas de moldeo (3 a 5%).

BIZCOCHO: Nombre utilizado en cerámica para designar un artículo que se ha quemado por primera vez y a una temperatura en la cual la pasta alcanza su madurez.

CAUDAL ESPECIFICO: Es el volumen de agua liberada en la unidad de tiempo, por unidad de área de la superficie de las cápsulas porosas.

CHAMOTA: Material cerámico calcinado que se muele bajo cierto estandar para ser utilizado con la arcilla cruda, como materia prima en la elaboración de piezas porosas del mismo material.

COLOIDE: Término que se usa para materiales tanto orgánicos como inorgánicos, que tienen partículas de tamaño muy pequeño y gran superficie específica.

COCHURA: Acción de cocer, o someter las piezas de arcilla a la acción del calor.

CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA: Una expresión de la facilidad del agua para fluir através del suelo en respuesta a cierto gradiente de potencial de agua.

CUARTEAR: Indica la acción de henderse o agrietarse, o sea cuando se presentan aberturas prolongadas en algunas superficies.

CUERPO CERAMICO: Mezcla de materiales que da como resultado una pasta cerámica con características deseables de trabajo y punto de quema.

DEFLOCULANTE: Compuesto(s) que conducen a la buena preparación de una barbotina, con propiedades de flujo y colada el cual permite la utilización de menos proporciones de agua y más arcilla, para poder trabajarse en el arte de la cerámica, bajo el método de repujado en molde de yeso; dichos compuestos pueden ser ácidos, bases y sales inorgánicas.

DEFLOCULAR: Separar los componentes individuales de partículas compuestas, por medios físicos y/o químicos. Ocasionar que las partículas de la fase dispersa de un sistema coloidal se

suspendan en el medio de dispersión.

DISPERSAR: Romper partículas compuestas, como agregados, en sus partículas componentes individuales. Distribuir o suspender partículas finas, como de arcilla, en o a través de un medio de dispersión, como el agua.

ESCAYOLA: Es esencialmente sulfato cálcico semihidratado, que se obtiene a partir del mineral yeso.

FLOCULACION: Acción físico-química ejercida por el molde de yeso sobre una barbotina desfloculada, produciendo el endurecimiento de ésta por la acción del ión calcio y ión sulfato presentes en el yeso, y poder formar así cuerpos cerámicos.

FRAGUADO: Es el tiempo que utiliza una mezcla (arcilla o yeso) para alcanzar cierto grado de dureza dentro de un molde, aun poseyendo cierto grado de humedad.

GLEYS: Nombre común que recibe el material utilizado para esmaltar las piezas de cerámica. Consiste básicamente de un tipo de vidrio en forma líquida, que se aplica a la superficie de los objetos a esmaltar, y luego que se le somete a una temperatura específica éste se fusiona con la superficie del objeto dando una superficie vítrea y no porosa.

MACHOTE: Término utilizado en cerámica para designar el objeto modelado en su forma preliminar, y del cual ha de obtenerse el primer molde.

MERMA: Reducción de volumen en las piezas cerámicas, provocada por la pérdida de agua

en la arcilla húmeda.

MODELADO: Acción y efecto de modelar, o sea de hacer figuras o adornos con arcilla, cera u otra materia plástica.

REFRACTARIEDAD: Cualidad de un cuerpo de resistir temperaturas. De acuerdo a este criterio, es la alúmina, el componente de las arcillas con mayor grado de refractariedad.

REFRACTARIO: Aplícase al cuerpo que resiste la acción de agentes químicos o físicos, y especialmente, altas temperaturas sin descomponerse.

REPUJADO: Es la acción y efecto de repujar, o sea de aplicar fuerza sobre las superficies de arcilla colocada sobre un molde, de tal manera que en una de sus caras resulten figuras y formas en relieve.

TEMPERATURA DE MADURES: Es la temperatura en la cual puede realizarse la mejor combinación de cualidades de fuerza, contracción y resistencia al choque. Este punto es un poco menor que el de vitrificación y se le encuentra haciendo ensayos. es la temperatura preferida para los objetos no vidriados.

TENSION DE LA HUMEDAD: Es la presión equivalente negativa del agua del suelo. Es igual a la presión que debe aplicarse al agua del suelo para colocarlo en equilibrio hidráulico, a través de una pared o membrana porosa, con un pozo de agua de la misma composición.

TIXOTROPIA: Propiedad e ciertas mezclas de arcillas, agua y productos químicos consistente

en tener características de flujo, dependientes de períodos anteriores de reposo o movimiento. Estas mezclas tienen la propiedad de adquirir rigidez, y convertirse en un gel, sin llegarse a separar en dos capas.

VACIADO: Se refiere a los objetos que son formados en moldes y a la acción de vaciar.

VIDRIADO: Aplicación de esmalte o gley a la superficie de un objeto de cerámica con el objeto de conseguir impermeabilidad, acabados y dar colores a dichos objetos.