

01162 11
296



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

TESIS

“ESTUDIO DE LA DISTRIBUCION DE GOTAS DE UN ASPERSOR AGRICOLA Y SU EFECTO EN LA UNIFORMIDAD Y SELLADO SUPERFICIAL DEL SUELO”

PRESENTADA POR:

JOSE MARIANO RODAS ACOSTA

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERIA
(HIDRAULICA)

253704

DIRIGIDA POR: DR. JUAN ENCISO MEDINA.



JIUTEPEC, MORELOS.

1998.

TESIS CON
FALLA LE CREEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**EL PRESENTE TRABAJO SE IMPRIMIÓ CON EL APOYO DE
LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA**

CON DEDICATORIA ESPECIAL

A mi esposa Violeta

que me acompaño y apoyo siempre en

los estudios de la maestría.

A mis hijos Ángel Cesar y Perla Violeta

quienes me han dado la fuerza y voluntad

para ir siempre hacia adelante.

A mis padres Delta y Cesar Augusto

que siempre han confiado en mi y he tenido su

apoyo para hacer realidad mis sueños.

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer de manera muy sincera

A la Comisión Nacional del Agua, que me permitió y apoyo para realizar mis estudios de maestría.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, que me albergó en su ceno para superarme profesionalmente.

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, por su apoyo en mi preparación y su disposición para realizar mi trabajo de Tesis.

Al Doctor Juan Enciso Medina, por su asesoría en el trabajo de Tesis y guía en mi preparación profesional.

A mis profesores por la formación de ellos recibida

A mis compañeros de estudios que siempre estuvieron en el momento justo para alentar y seguir adelante.

RESUMEN

El presente trabajo se realizó en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, en el se estudia la distribución de gotas generadas por un aspersor agrícola con la finalidad de poder ver como afecta la Uniformidad de Riego y el sellado del suelo; el estudio se hizo mediante dos formas: uno obteniendo datos experimentales a través de filmaciones con cámara de alta velocidad de la distribución de gotas y otro modelando las trayectorias que siguen las gotas generadas por un aspersor, resolviendo para ello las ecuaciones de la teoría balística que explican la trayectoria de un proyectil lanzado desde un punto de la superficie del suelo.

Las condiciones de filmación y modelación fueron bajo condiciones de laboratorio sin la presencia de viento. De los resultados se lograron obtener filmaciones de las gotas al momento de impactarse prácticamente en la superficie, con el modelo se logró reproducir las trayectorias que siguen las gotas desarrollando un esquema numérico basado en el método de Runge-Kutta de cuarto orden. Las conclusiones más importantes del trabajo fueron los siguientes:

- Se obtuvieron filmaciones de la distribución de gotas, para lo cual se desarrolló una metodología que permitió obtener filmaciones adecuadas de la distribución.
- Se pudo desarrollar el esquema numérico y programarlo en lenguaje qbasic, que permitió modelar la trayectoria de las gotas que genera un aspersor bajo condiciones de no viento, sin embargo es necesario obtener mejores valores del coeficiente de arrastre que involucre la deformación que sufre la gota en su trayectoria.
- De la comparación entre datos experimentales y del modelo, se obtuvo cierta congruencia en los datos sin embargo es necesario afinar tanto la metodología de filmación como los valores del coeficiente de arrastre.
- En relación a los datos obtenidos por el modelo del diámetro de gota y su velocidad al momento de impactarse en la superficie del suelo en la fórmula empírica para la disminución de la velocidad de infiltración que es una medida del sellado del suelo, se pudo cuantificar los efectos de los diferentes tamaños de gotas. Por otro lado se pudo cuantificar la cantidad de energía cinética producida por las gotas al impactarse en el suelo y que es la energía que provoca el desligamiento de las estructura del suelo provocando su sellado superficial.

ÍNDICE

PÁGINAS

ÍNDICE DE GRÁFICAS.	IV
ÍNDICE DE FIGURAS, TABLAS Y FOTOS.	VI
I. INTRODUCCIÓN.	1
II. OBJETIVOS.	3
III. ANTECEDENTES.	4
3.1. EL ROMPIMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE GOTAS DE CHORROS DE ASPERSIÓN.	4
3.1.1. Teorías de rompimiento y distribución de gotas del chorro.	5
3.1.2. Estudios del rompimiento y distribución de gotas del chorro.	7
3.1.2.1. Ecuaciones que gobiernan el movimiento de una gota en un medio con resistencia.	8
3.1.2.2. El medio y su influencia en el movimiento de las gotas.	14
3.2. FACTORES QUE AFECTAN EL ROMPIMIENTO DEL CHORRO Y FORMACIÓN DE GOTAS.	15
3.2.1. Factores intrínsecos.	19
3.2.1.1. Presión de operación.	19
3.2.1.2. Boquilla del aspersor.	22
3.2.1.3. Ángulo de aspersión.	22
3.2.2. Factores Externos.	23
3.2.2.1. Condiciones de viento.	23
3.3. EFECTO DEL ROMPIMIENTO DEL CHORRO Y FORMACIÓN DE GOTAS EN PARÁMETROS DE RIEGO	26
3.3.1. Uniformidad de riego.	26

ÍNDICE

PÁGINAS

3.3.2. Efecto del impacto de las gotas en la superficie del suelo.	29
3.3.3. Pérdidas por evaporación de gotas.	36
3.4. RESUMEN DE ANTECEDENTES	37
I.V. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO..	40
4.1. SITUACIONES DE ESTUDIO.	40
4.2. OBTENCIÓN DE LOS DATOS EXPERIMENTALES.	40
4.2.1. Equipo e instalación para la obtención de datos experimentales.	40
4.2.1.1. Instalación del aspersor.	40
4.2.1.2. Equipo para grabaciones de imágenes de distribución de gotas del aspersor.	42
4.2.2. Prueba sencilla de aspersion.	43
4.2.3. Videograbación de la distribución de gotas de aspersion.	47
4.2.3.1. Planeación de la filmación de gotas.	47
4.2.3.2. La cámara y forma en que se filmo	49
4.2.3.3. Los programas MAP y MAW	51
4.3. DESARROLLO DEL MODELO NUMÉRICO DE LAS ECUACIONES QUE GOBIERNAN LAS TRAYECTORIAS DE LAS GOTAS.	52
4.3.1. Solución de las ecuaciones de la coordenada horizontal.	53
4.3.2. Solución de las ecuaciones para la coordenada vertical.	55
4.4. COEFICIENTE DE ARRASTRE.	58
4.5. METODOLOGÍA DE APLICACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE GOTAS	59

ÍNDICE	PÁGINAS
4.5.1. Análisis de la distribución de gotas.	59
4.4.2. Reducción de la velocidad de infiltración.	59
4.4.3. Reducción de infiltración y energía cinética.	60
V. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	62
5.1. PRUEBA DE ASPERSIÓN.	62
5.2. RESULTADOS DE LAS FILMACIONES CON CÁMARA DE ALTA VELOCIDAD.	64
5.2.1. Metodología desarrollada de filmación de chorros de aspersión en condiciones de laboratorio	66
5.3. MODELO BALÍSTICO DE LA TRAYECTORIA DEL CHORRO .	70
5.4. COMPARACIÓN DE DATOS DE GOTAS DEL MODELO Y EXPERIMENTALES.	75
5.5. REDUCCIÓN DE LA INFILTRACION DE LA VELOCIDAD DE IMPACTO DE LAS GOTAS.	78
5.5.1. Análisis de la producción de energía cinética.	80
VI. CONCLUSIONES.	83
VII. RECOMENDACIONES.	85
VIII. BIBLIOGRAFÍA.	87
IX. APÉNDICE: Instructivos de los programas GOTASP Y RADIAL.	91
X. ANEXO	99

ÍNDICE DE GRÁFICAS.

PÁGINAS

Gráfica 1. Relación entre coeficiente de arrastre y diámetro de gota (R. D. Von Bernuth, J. R. Gilley, 1984).	15
Gráfica 2. Distancias calculadas y medidas alcanzadas por diferentes tamaños de gotas operando a una presión de 300 Kpa. (Ido Seginer, Dov Nir, 1991).	16
Gráfica 3. Factor de arrastre (f_D) como una función del número de Reynolds y el factor de forma (Tomado de Aksel L. Lydersen, 1979).	17
Gráfica 4. Trayectoria de gotas de 3.4 mm. de diámetro, velocidad de viento 4 m/s y presión de operación de 400 Kpa. (Von Bernuth R. D., 1988).	23
Gráfica 5. Volumen medio de tamaño de gotas vs. distancia (Von Bernuth, 1988).	25
Gráfica 6. Distribución de energía cinética para tamaños de gotas, como función de la boquilla y presión (Jensen, 1983).	34
Gráfica 7. Energía cinética para diferentes presiones y tipos de aspersores (Kohl, De Boer y Evenson, 1985).	35
Gráfica 8. Máxima masa de gotas producidas por varios tamaños de boquillas operando a diferentes presiones (Jensen, 1983).	36
Gráfica 9. Prueba de aspersion sencilla para diferentes presiones, aspersor de impacto con ángulo de trayectoria de 11 grados.	63
Gráfica 10. Trayectoria de una gota de 0.993 mm, 10 m.c.a.	70
Gráfica 11. Trayectoria de una gota de 0.993 mm, 15 m.c.a.	71
Gráfica 12. Trayectoria de una gota de 0.993 mm, 20 m.c.a.	71
Gráfica 13. Alcances de diámetros de gotas con diferentes presiones.	72

ÍNDICE DE GRÁFICAS.

PÁGINAS

Gráfica 14. Velocidad de impacto de gotas para diferentes presiones.	73
Gráfica 15. Velocidad absoluta en el tiempo, de una gota a diferentes presiones.	74
Gráfica 16. Velocidad absoluta de gotas en el tiempo, para diferentes diámetros de gotas.	75
Gráfica 17. Comparación de datos del modelo con datos experimentales, de diámetros y velocidades de gotas.	76
Gráfica 18. Cocientes de datos medios del modelo entre experimental	77
Gráfica 19. Reducción de infiltración, para $P = 10$ m.c.a., suelo BARNES.	79
Gráfica 20. Reducción de la infiltración para $p = 15$ m.c.a., suelo BARNES.	79
Gráfica 21. Reducción de la infiltración para $P = 20$ m.c.a., suelo BARNES.	80
Gráfica 22. Producción de energía cinética por lámina precipitada, $P = 10$ m.c.a.	81
Gráfica 23. Producción de energía cinética, presión 15 m.c.a. . . .	82
Gráfica 24. Producción de energía cinética, presión 20 m.c.a. . . .	82

ÍNDICE DE FIGURAS, TABLAS Y FOTOS PÁGINAS

Figura 1. Esquema de la trayectoria de una gota.	8
Figura 2. Patrones de aplicación de aspersores individuales, con diferentes presiones(Claude H. P. ,1983).	20
Figura 3. Patrón de aplicación de agua resultante de la sobreposición de aspersoreslaterales (Cuenca, H. R. ,1989)	21
Figura 4. Efecto de condición de viento con velocidad baja en un patrón dedistribución de agua aplicada(Cuenca, 1989).	24
Figura 5. Efecto de velocidad de viento alta enun patrón de distribución de agua aplicada (Cuenca, 1989).	25
Figura 6. Esquema de instalación del aspersor.	41
Figura 7. Esquema de localización de colectores para el método radial, y colectores generados como si fuera el método de campo.	45
Figura 8. Diagrama de flujo del programa RADIAL.BAS.	46
Figura 9. Forma y colocación del equipo defilmación de la distribución de gotas.	48
Figura 10. Flujograma del programa GOTASP.BAS.	57
Figura 11. Filmaciones de gotas de archivos digitalizados a una presión de 15 m.c.a. y a 2 m. del origen de aspersion	65
Figura 12. Filmaciones de gotas de archivos digitalizados a una presión de 15 m.c.a. y a 5 m. del origen de aspersion	65
Figura 13. Filmaciones de gotas de archivos digitalizados a una presión de 15 m.c.a. y a 8 m. del origen de aspersion	65
Figura 14. Filmaciones de gotas de archivos digitalizados a una presión de 10 m.c.a. y a 5 m. del origen de aspersion	118

ÍNDICE DE FIGURAS, TABLAS Y FOTOS **PÁGINAS**

Figura 15. Filmaciones de gotas de archivos digitalizados a una presión de 10 m.c.a. y a 5 m. del origen de aspersión . 118

Figura 16. Filmaciones de gotas de archivos digitalizados a una presión de 10 m.c.a. y a 5 m. del origen de aspersión . 118

Figura 17. Filmaciones de gotas de archivos digitalizados a una presión de 20 m.c.a. y a 2 m. del origen de aspersión . 119

Figura 18. Filmaciones de gotas de archivos digitalizados a una presión de 20 m.c.a. y a 5 m. del origen de aspersión . 119

Figura 19. Filmaciones de gotas de archivos digitalizados a una presión de 20 m.c.a. y a 8 m. del origen de aspersión . 119

Figura 20. Pantalla de presentación del programa GOTASP 93

Figura 21. Entrada de nombres de archivos 93

Figura 22. Entrada de datos para cálculo 94

Figura 23. Salida de datos de cálculo 95

Figura 24. Pantalla de presentación del programa RADIAL 96

Figura 25. Entrada de datos de distribución de los capturadores de precipitación 97

Figura 26. Entrada de datos de la lámina capturada por los botes, por la prueba del Método Radial 97

Figura 27. Datos de precipitación interpolados y el C.U. 98

Tabla 1. Velocidades terminales de gotas en caída vertical como una función del diámetro de gotas, (Tomado de Laws, 1941). 13

Tabla 3. Distribución de las filmaciones de la distr. de gotas. 48

Tabla 4. Resultados del aforo del aspersor de prueba, Naan 322/94. 62

ÍNDICE DE FIGURAS, TABLAS Y FOTOS

PÁGINAS

Tabla 5. Datos experimentales para el análisis de la uniformidad de riego.	100
Tabla 6. Datos de archivos de filmaciones de gotas para su análisis por el programa MAW.	101
Tabla 7. Muestra de datos de archivos de filmaciones de gotas, tiempos en seg., Unidades de longitud y velocidad en cm y cm /seg. respectivamente.	103
Tabla 8. Muestra de datos de archivos ALCANCE.DAT generado por el programa GOTASP.BAS.	106
Tabla 9. Muestra de datos de archivo TRAYEC.DAT generado por el programa GOTASP.BAS.	111
Tabla 10. Resumen de filmaciones de gotas con la cámara de alta velocidad, datos de diámetros y velocidad absoluta. . . .	115
Tabla 11. Análisis de energía cinética y reducción de la velocidad de infiltración en gotas del modelo	117
Foto 1. Instalación del aspersor	41
Foto 2. Cámara de filmación de alta velocidad del equipo Kodak Ektapro	42
Foto 3. Monitor y modulo central de procesamiento del equipo Kodak Ektapro, así como la computadora personal usada para el análisis de imagenes	43
Foto 5. Colocación de los colectores para la prueba de aspersion	44
Foto 6. Colocación de la pantalla de filmación, tela azul cielo	68
Foto 7. Iluminación de la zona de filmación de gotas	68
Foto 8. Colocación de la cámara de filmación	69

I. INTRODUCCIÓN

La producción de la agricultura de riego depende, en gran medida, de la eficiencia de riego, si el agua necesaria para el crecimiento de las plantas, no se aplica de manera uniforme, las producciones son afectadas en sus rendimientos provocando menores ingresos económicos, además, tomando en cuenta que en muchas áreas de riego el recurso agua es muy limitado y que su aprovechamiento por los cultivos es decisivo en la obtención de buenas producciones, se hace importante mejorar la eficiencia del uso del agua.

Existen diferentes métodos de riego, que comúnmente se agrupan en riegos por gravedad y presurizados, los más usados a nivel mundial son los de gravedad, pero debido a la necesidad de eficientizar el uso del agua, al avance tecnológico en el diseño y fabricación de las partes de los sistemas presurizados, estos, tienden a extenderse.

Uno de los métodos presurizados de mayor uso y más conocidos son los de aspersores tipo rehiletos, para este tipo de método se conoce bien la hidráulica para su diseño, pero no está muy bien estudiado, que pasa con el chorro de agua cuando deja la boquilla del aspersor, como se rompe, se genera y distribuye la lluvia de gotas, que consecuentemente caen en el suelo o sobre el cultivo que se está regando.

Esta distribución de gotas, tiene efecto sobre la uniformidad de riego, los patrones de aspersión, la evaporación de gotas y la intensidad de la lluvia que en cierto momento nos puede producir escurrimiento como consecuencia de la fuerza con

que se impactan las gotas en la superficie, y que provoca el desligamiento de los agregados del suelo, produciendo encostramiento y aumentando el escurrimiento superficial. Todos estos factores, afectan en forma directa la eficiencia del uso del agua por los cultivos.

La distribución de gotas es afectada por las condiciones de operación, intrínsecas al mismo aspersor, como son, la presión de operación, el diámetro de la boquilla, el ángulo de aspersión y por el mismo mecanismo de giro del aspersor, que en la mayoría de los casos son aspersores con mecanismo de impacto; por otra parte, existen condiciones de operación externas al aspersor, que son, el viento, la temperatura y la resistencia misma del medio que se opone al movimiento de las gotas de agua.

Todas estas situaciones han hecho, que un buen número de investigadores de diversos campos de la ciencia, hayan estudiado el fenómeno físico. Rayleigh (1878), estudio el crecimiento de pequeños disturbios en chorros cilindricos; Cheremisinoff (1986), contribuyo a la teoría del rompimiento de chorros líquidos turbulentos; Seginer, *et al.* (1991), Von Bernuth y Gilley (1984), simularon el efecto del viento en la distribución del tamaño de gotas y patrones de aspersión; todos ellos, de una u otra forma han contribuido a tener cierto conocimiento del fenómeno físico en cuestión. Algunas veces para ello se ha tenido que hacer mediciones indirectas y asumir ciertas suposiciones que simplifican el problema real. Debido a la importancia de eficientizar el uso del agua, y a la teoría y estudios generados del rompimiento, formación y distribución de gotas de los chorros de aspersión; surge el interés de aprovechar esos conocimientos, para aplicarlo al estudio de factores que afectan el uso eficiente del agua por los cultivos.

II. OBJETIVOS

Considerando lo expuesto son objetivos del presente trabajo:

1. MEDIANTE EL USO DE UNA CÁMARA DE VIDEOGRABACIÓN DE ALTA VELOCIDAD PODER ESTUDIAR LA DISTRIBUCIÓN DE GOTAS DE UN ASPERSOR AGRÍCOLA
2. DESARROLLAR UN MODELO NUMÉRICO QUE NOS PERMITA PREDECIR LA DISTRIBUCIÓN DE GOTAS DE UN CHORRO DE ASPERSIÓN.
3. MEDIANTE EL MODELO Y DATOS OBSERVADOS PODER ESTUDIAR LA UNIFORMIDAD DE RIEGO DE UN SISTEMA DE ASPERSIÓN.
4. CON EL MODELO, PODER ESTUDIAR EL EFECTO DEL TAMAÑO DE GOTAS Y SU VELOCIDAD DE IMPACTO EN LA REDUCCIÓN DE LA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN EN EL SUELO.

III. ANTECEDENTES

3.1. EL ROMPIMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE GOTAS DE CHORROS DE ASPERSIÓN.

Muchos investigadores, han dirigido sus estudios, a explicar, como se rompe un chorro de aspersión agrícola, también, han buscado una manera de estudio, que permita conocer con certeza la distribución de las gotas que caen a lo largo del radio de aspersión. El interés de ello radica en poder diseñar un aspersor que trabaje con la mejor uniformidad posible en la distribución de lluvia de gotas que se precipitan alrededor del aspersor, buscando en última instancia obtener una mejor eficiencia en el uso del agua.

Jensen M. E. (1983), menciona dos razones importantes por lo cual, se debe estudiar la distribución de las gotas de un aspersor agrícola:

1. Debido a que las gotas de menor tamaño están sujetas a la velocidad del viento, distorsionando los patrones de aplicación de agua, para el cual, se diseñó el sistema de riego.
2. Por que las gotas de mayor tamaño poseen cantidades grandes de energía cinética, que es transferida a la superficie, causando desligamiento de las partículas del suelo, provocando costras que resultan en encharcamientos y escurrimientos.

Von Bernuth *et al.* (1984), menciona también que la información que se pueda obtener sobre la distribución del tamaño de gotas de aspersión es importante por que interfiere en que exista una mayor o menor evaporación de las gotas más pequeñas.

3.1.1. Teorías de rompimiento y distribución de gotas del chorro.

Rouse *et al.* (1952), mencionado por Heermann(1983); explica que el rompimiento del chorro se presenta después que la superficie del mismo ha sido suficientemente disturbado como para producir una apreciable fuerza de resistencia, de tal forma que la acción del medio, empieza a tener efecto en el chorro, tal resistencia es proporcional al cuadrado de la velocidad del agua, y debido a esto se generan remolinos en el chorro, llevando el agua lateralmente hacia afuera de la corriente central, de tal forma que se genera una expansión y disminución de la velocidad del chorro, formándose seguidamente gotas, de tal forma que el chorro desaparece, transformándose en una mezcla expandida de gotas de agua dispersa y aire, que viajan siempre en un decremento de la velocidad, pero llevando siempre un incremento del volumen de aire en movimiento.

La descripción anterior, pareciera que habla de un chorro que no es obstaculizado por algún mecanismo, caso contrario, al de los aspersor con mecanismo de impacto, que en la rotación del aspersor el chorro es afectado por el torque del brazo, que es el mecanismo que hace que el aspersor gire, que a la vez interfiere en el rompimiento del chorro de aspersión,

Ido Seginer *et al.* (1991), menciona que como resultado del choque del brazo del aspersor con el chorro, éste, es cortado en segmentos que se mueven a través del

aire casi independientemente de otro chorro y que la última parte de un segmento de chorro encuentra menor resistencia al aire, que la parte delantera, cada uno de los segmentos del chorro, se desintegra a lo largo de la trayectoria en gotas de varios tamaños; las gotas de mayor tamaño tienden a caer en el suelo lejos del aspersor (Frost y Schawalen 1955; Schleusener y Kidder 1960; Kohl 1974 mencionados por Ido Seginer (1991), debido a que la razón de arrastre para la fuerza de inercia es pequeña para estas gotas.

El tratar de modelar el comportamiento de un chorro de aspersion, es muy complejo, se ha logrado hacer, haciendo suposiciones simplificadoras del fenómeno físico, en los cuales se ha obtenido buenos resultados.

Sin embargo estudios que usan técnicas de fotografía y videograbación, han podido constatar directamente, Richard D. Hawkes y Derrel L. Martin (1992), que las simplificaciones introducidas en los modelos pueden provocar graves errores, ellos hicieron un experimento para evaluar el efecto de la presión y la velocidad del viento en el rompimiento y formación de gotas, utilizando fotografías y videograbaciones y encontraron, que prácticamente el chorro empieza a romperse a partir desde el momento que sale de la boquilla, observaron un amplio rango de diámetros de gotas inclusive a 3 m. de distancia del aspersor, también, que la forma de las gotas es muy variable, que no son estrictamente esféricas como se asume en los modelos, observaron además que la presencia del viento provoca mayor rompimiento del chorro y que las gotas o glóbulos de agua se van rompiendo a lo largo de su trayectoria. Lo anterior sugiere que es necesario estudiar de manera más directa el proceso físico de rompimiento que desde luego genera una cierta distribución de gotas.

3.1.2. Estudios del rompimiento y distribución de gotas del chorro aspersión.

La cinemática es la parte de la física que estudia el movimiento de las partículas sin importar las causas que lo producen, sin embargo, cuando en el movimiento de las mismas introducimos los conceptos de masa y fuerza, las ecuaciones que gobiernan el movimiento de las mismas se clasifican como dinámicas, las cuales, engloban las leyes del movimiento de Newton.

Synge J. L. y Byron (1965), mencionan que en la trayectoria que sigue un proyectil en el espacio disparado desde cierta ubicación, se encuentra sujeto a diversas fuerzas, y por lo cual las ecuaciones que gobiernan el movimiento del proyectil son consideradas como dinámicas, la teoría que explica tales trayectorias, es la teoría balística. Este tipo de movimientos guarda mucha semejanza con la trayectoria que siguen los chorros de aspersores agrícolas, ya que un chorro al estar en contacto con la atmósfera, en cierto momento rompe en un gran número de gotas, que pueden ser tratadas como proyectiles individuales.

White H. E. (1985), explica que la balística de la trayectoria de las partículas, parte básicamente de la segunda ley de Newton que se expresa de la siguiente forma **"Cuando a un cuerpo se le aplica una fuerza de magnitud constante, la aceleración resultante es proporcional a la fuerza e inversamente proporcional a la masa"**, matemáticamente su expresión es $a = F/m$, donde a = aceleración, F = fuerza y m = masa, la aceleración tiene lugar en la dirección de las fuerzas actuantes.

3.1.2.1. Ecuaciones que gobiernan el movimiento de una gota en un medio con resistencia.

Para deducir las ecuaciones haremos el análisis suponiendo que la gota se mueve en un plano, figura 1, y que no existen fuerzas actuantes perpendiculares al movimiento de la gota.

Si la partícula se mueve en un plano, podemos determinar su posición en coordenadas rectangulares (x, y). Partiendo de la segunda ley de Newton, podemos deducir que $F = m a$, y de la teoría balística se sabe que cuando en la atmósfera no existen fuerzas de resistencia, la trayectoria que describe el proyectil es una parábola, esto significa que la aceleración en la coordenada horizontal es igual a cero y que la aceleración en la coordenada vertical es igual a la aceleración de la gravedad.

Cuando el medio ofrece resistencia al movimiento se genera un esquema de fuerzas como el de la figura 1, y por lo tanto la aceleración que se genera en

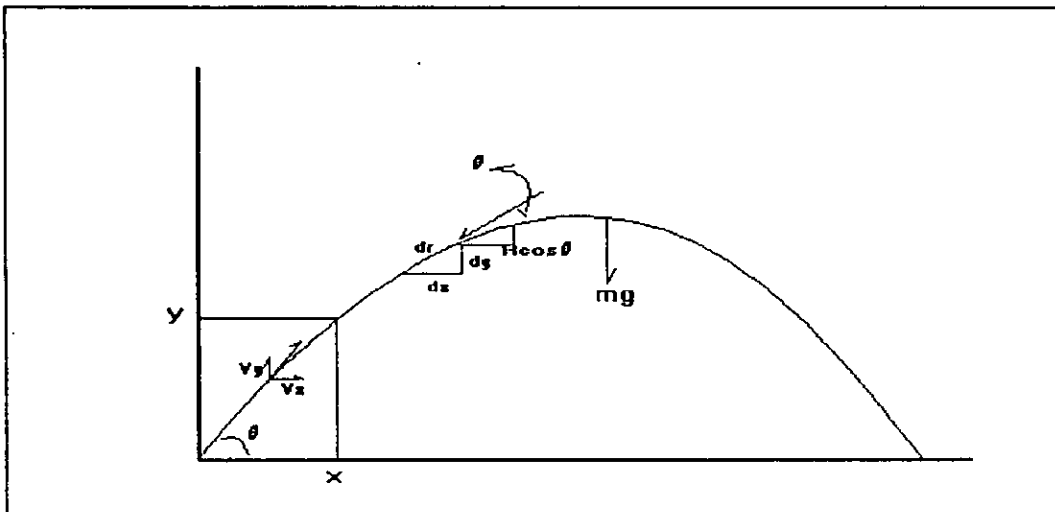


Figura 1. Esquema de la trayectoria de una gota.

la coordenada horizontal es igual a:

$$m a_x = - f r_x \quad (Ec. 1)$$

aceleración que se produce en el eje vertical es igual a:

$$m a_y = mg - f r_y \quad (Ec. 2)$$

la resultante será la suma vectorial de las componentes de aceleración en x, y.

$$m a_r = mg - f r_x - f r_y \quad (Ec. 3)$$

Donde:

m = Masa

a_x = Aceleración en x

a_y = Aceleración en y

a_r = Aceleración resultante

fr = Fuerza de resistencia en x y y

g = Aceleración de la gravedad.

Grant R. F. (1962), Dice que si asumimos que la fuerza de resistencia es proporcional a la primera potencia de la velocidad $fr = cv$, se obtendría una solución exacta de las ecuaciones, pero incurriríamos en un substancial error, lo cual haría que la solución no se comportara como la realidad. Por ello se ha propuesto que la relación mas real, es aquella en la cual la fuerza de resistencia es proporcional a la segunda potencia de la velocidad $fr = Cv^2$, Donde C es un coeficiente de proporcionalidad

conocido también como coeficiente de arrastre. Además tomando en cuenta el ángulo de la trayectoria y una velocidad de referencia (v_r) con la que sale la gota de la boquilla, podemos descomponer esta velocidad en sus componentes horizontal y vertical, las cuales son.

$$V_x = V_r \cos \theta \quad V_y = V_r \operatorname{sen} \theta \quad (\text{Ec. 4})$$

Haciendo las sustituciones de las ecuaciones 4 en las ecuaciones 1, 2 y 3 expresadas en forma diferencial tenemos.

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -c V_r^2 \cos \theta \quad (\text{Ec. 5a})$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = mg - c V_r^2 \operatorname{sen} \theta \quad (\text{Ec. 5b})$$

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = mg - c V_r^2 (\cos \theta + \operatorname{sen} \theta) \quad (\text{Ec. 5c})$$

...

Las ecuaciones 5a a 5c rigen el movimiento de una gota en su viaje en la atmósfera, se han solucionado por métodos numéricos y analíticos.

Thooyamani K. P. y Norum D. I. (1989), presentan una solución analítica en términos adimensionales, donde siendo consecuentes con Seginer, asumen que la fuerza de arrastre es proporcional a la segunda potencia de la velocidad de la gota e introducen

un valor característico, conocido como velocidad terminal (u_t) de la gota que simplifica bastante la solución de las mismas, logran desarrollar ecuaciones algebraicas para la velocidad Horizontal (V_x), desplazamiento horizontal (S_x), velocidad vertical (V_z) y el desplazamiento vertical (S_z), con las cuales pueden determinar el desplazamiento en términos adimensionales de un tamaño de gota dada, En las ecuaciones V_{z0} y V_{r0} son las componentes verticales de la velocidad en el $T = 0$, en forma adimensional y que corresponde a las componentes de velocidad a la salida de la boquilla, S_{z0} corresponde a la elevación del elevador en forma adimensional. Las ecuaciones para velocidad y desplazamiento horizontal son:

$$V_x = \frac{V_{r0}}{1 + V_{r0} T} \quad (Ec. 6)$$

$$S_x = \ln (1 + V_{r0} T) \quad (Ec. 7)$$

Cuando el movimiento de la gota es hacia arriba, la velocidad vertical es positiva y las ecuaciones de la velocidad y desplazamiento vertical son:

$$V_z = \tan \left(\tan^{-1} V_{z0} - T \right) \quad (Ec. 8)$$

$$S_z = S_{z0} + \ln \left(\cos T - V_{z0} \sin T \right) \quad (Ec. 9)$$

Cuando el movimiento de la gota es hacia abajo la velocidad vertical es negativa y las ecuaciones de la velocidad y desplazamiento vertical son:

$$V_z = -\tanh (T - \tanh^{-1} V_{z0}) \quad (Ec. 10)$$

$$S_z = S_{z0} + \ln (\cosh T - V_{z0} \sinh T) \quad (Ec. 11)$$

La ecuación 8 y 9 son aplicables hasta que la velocidad vertical de ascenso es cero, en ese instante se habrá alcanzado la elevación máxima y un tiempo de elevación máxima (T_m) que se calcula con:

$$T_m = \tanh^{-1}(V_{z0}) \quad (Ec. 12)$$

que sustituida en la ecuación 9 nos proporciona la elevación máxima, ecuación 13.

$$S_{zm} = S_{z0} + \frac{1}{2} \ln (1 + V_{z0}^2) \quad (Ec. 13)$$

Cuando $T > T_m$, la velocidad vertical será negativa y T en la ecuación 10 será reemplazada por $(T - T_m)$ y tomando $V_{z0} = 0$ la ecuaciones resultantes para V_z y S_z serán:

$$V_z = -\tanh (T - T_m) \quad (Ec. 14)$$

$$S_z = S_{z0} + \frac{1}{2} \ln (1 + V_{z0}^2) - \ln [\cosh (T - T_m)] \quad (Ec. 15)$$

Estas ecuaciones presentan una situación particular, que solamente tienen validez

siempre y cuando la gota en cuestión alcance en su caída la velocidad terminal (u_t), se presenta una tabla de datos experimentales obtenidos por Laws J. O. (1941), de velocidad terminal en función de los diámetros de gotas, parece que para

Diámetro de gota (mm)	Velocidad terminal u_t (m/s)
1.75	6.08
2.00	6.58
2.25	7.02
2.50	7.41
2.75	7.76
3.00	8.06
3.25	8.31
3.50	8.52
3.75	8.71
4.00	8.86
4.50	9.10
5.00	9.25

Tabla 1. Velocidades terminales de gotas en caída vertical como una función del Diámetro de gotas, (tomado de Laws, 1941).

alturas de vuelos máximos que se presentan en la mayoría de los aspersores (entre 1.5 a 5 m.) es difícil que se presente la velocidad terminal.

Bosch D. D. y Onstad Ch. A. (1986). Mencionan en un trabajo, donde simulaban lluvias, que para asegurar que la velocidad terminal de las gotas se presentara en la

superficie del suelo, la altura de caída de las gotas debería ser de cuando menos 11 m. de altura.

3.1.2.2. El medio y su influencia en el movimiento de las gotas.

El movimiento de las gotas en el aire es afectado por el viento en el sentido horizontal y por la fuerza de gravedad en el sentido vertical, existe otra fuerza que influye en el movimiento de una gota, es la fuerza de arrastre, que se opone al movimiento relativo de las gotas en el aire.

Aksel L. Lydersen (1979), menciona que existen varias formulaciones para representar la fuerza de arrastre y que en forma general, el arrastre en una gota que se mueve con velocidad relativa (V), en la atmósfera es:

$$F = f_D A \rho \rho V^2 / 2 \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde:

A_p = Area de la partícula proyectada en un plano normal a la dirección del movimiento, m^2 .

f_D = Factor de arrastre (Coeficiente de arrastre), m/seg, el cual tiene varias formulaciones.

ρ = densidad del agua, kg/m^3 .

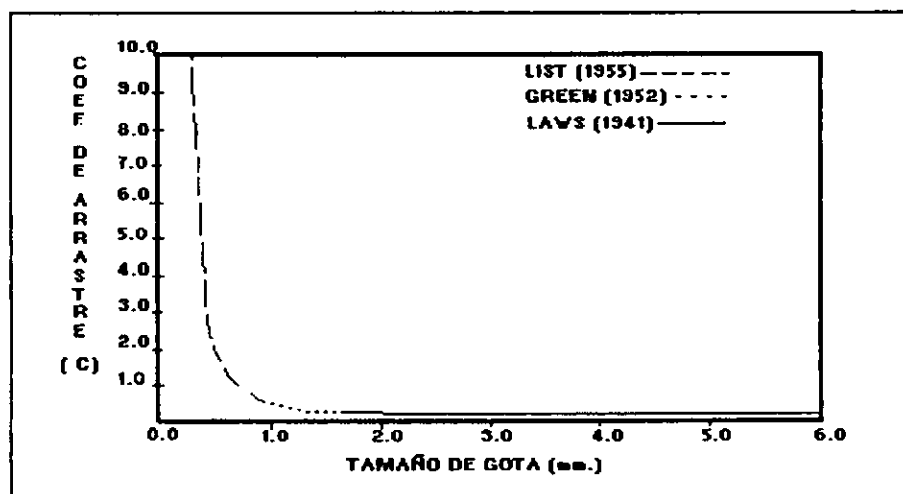
V = La velocidad relativa de la gota m/seg.

La fórmula anterior genera unidades de Newton. Existen fórmulas de las ecuaciones del movimiento de una gota donde la fuerza de arrastre está representada por un coeficiente de arrastre (C) multiplicado por la velocidad al cuadrado.

Una de las variables más difíciles de evaluar de la ecuación de la teoría balística es la fuerza de arrastre y que comúnmente se reduce a determinar el coeficiente de arrastre. Soares A. A., Willardson L. S. (1991), mencionan que este coeficiente tradicionalmente esta considerado como función del Número de Reynolds, Pero también existen autores que consideran a C como una función del tamaño de la gota. Un ejemplo de esta función es la gráfica que genera los coeficientes de Seginer, gráfica 1.

Ido Seginer y Dov Nir(1990), hicieron un estudio donde compararon las siguientes formulaciones del coeficiente de arrastre.

1. Los valores del coeficiente de arrastre de la curva generada por Seginer, gráfica 1.



gráfica 1. Relación entre coeficiente de arrastre y diámetro de gota (R. D. Von Bernuth, J. R. Gilley 1984).

2. La formulación de After y Gu (1989), proponen la siguiente función:

$$C_2 = 0.4671 D^{-0.9859} \quad (\text{Ec. 17})$$

3. Fukui *et al.* (1980), presenta unas fórmulas para calcular C que son dependientes del número de Reynolds.

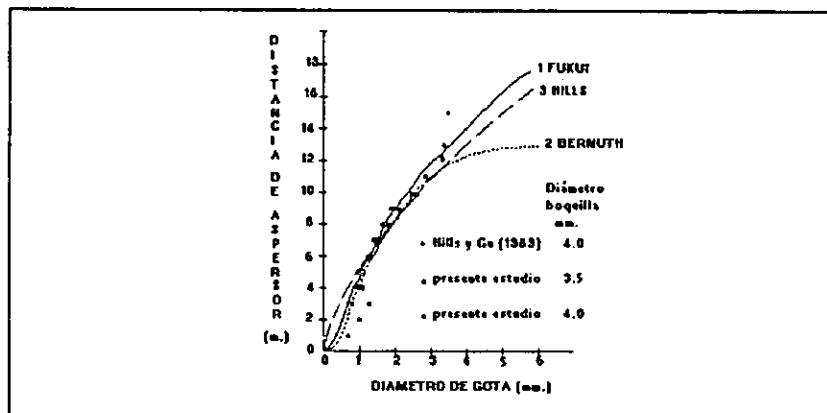
$$R \leq 128 \quad c(R) = 33.3 / (R + 0.0033 R + 1.2) \quad (\text{Ec. 18})$$

$$128 \leq R \leq 1440 \quad c(R) = 72.2 / (R + 0.0000556 R + .48) \quad (\text{Ec. 19})$$

$$1440 > R \quad c(R) = 0.45 \quad (\text{Ec. 20})$$

donde el número de Reynolds es definido por el diámetro nominal de la gota.

En el trabajo se pudo observar, según gráfica 2, que para un aspersor trabajando a una presión de 300 Kpa y con un elevador de 1 m., que las formulaciones de Fukui y Hills presentan consistencia con los datos observados.

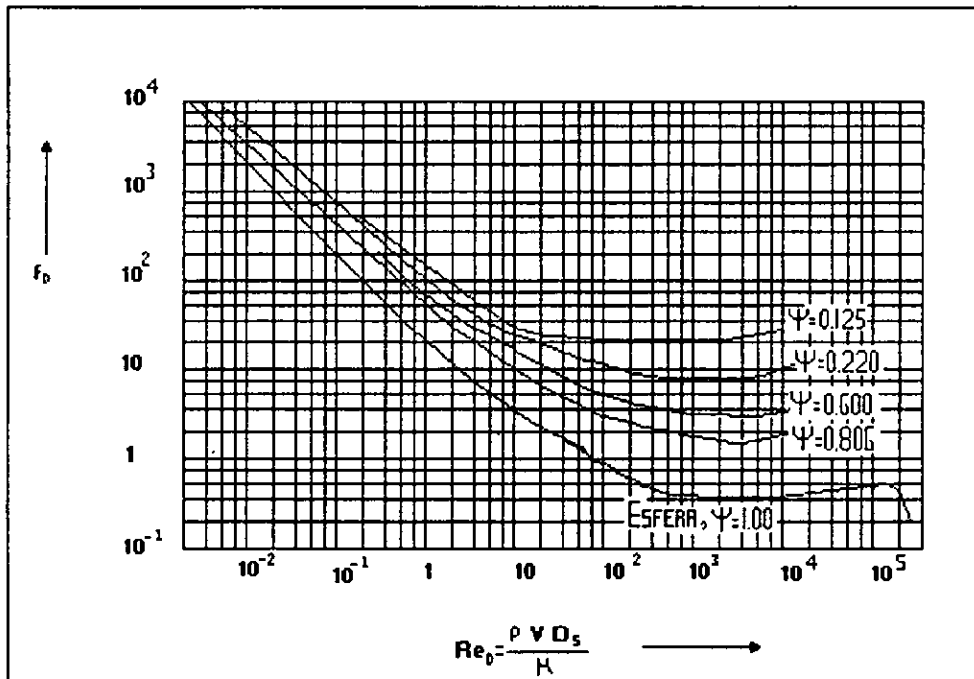


Gráfica 2. Distancias calculadas y medidas, alcanzadas por diferentes tamaños de gotas: Operando a una presión de 300 Kpa, (Tomado de Ido Seginer, Dov Nir, 1991).

Aksel L. Lydersen (1979), determina el coeficiente de arrastre (C) como una función del número de Reynolds y un factor de forma ψ , que se relacionan por medio de la gráfica 3, y donde ψ es:

$$\psi = \frac{\text{sup. de una esfera con el mismo vol. que el de la part.}}{\text{Superficie de la partícula}}$$

En el número de Reynolds de la gráfica 3 D_s es el diámetro de una esfera con el mismo volumen que el de la partícula.



Gráfica 3. Factor de arrastre (f_D) como una función del número de Reynolds y el factor de forma (Tomada de Aksel L. Lydersen, 1979).

Para propósitos de cálculo es conveniente sustituir la curva para una esfera ($\psi = 1.0$) en la gráf. 4, por una serie de líneas rectas, que nos dan los siguientes factores de arrastre.

para $500 < Re_0 < 200,000$, $f_D = .44$ (Ec. 21)

$$\text{para } 2 < Re_o < 500, f_o = 18.5 Re_o^{-0.5} \quad (\text{Ec. 22})$$

$$\text{para } 0.00001 < Re_o < 2, f_o = 24 Re_o^{-1} \quad (\text{Ec. 23})$$

Todas las formulaciones y gráficas presentadas, están basadas en el diámetro de la gota y el número de Reynolds. En recientes estudios realizados por Derrel L. Martin, Richard Hawkes y George Meyer (1993), en el cual se uso una técnica de videograbación de alta velocidad, encontraron que las formulaciones para el coeficiente de arrastre en donde el diámetro de la gota se toma como constante y se asumen gotas totalmente esféricas, pueden tener errores significativos, ya que ellos observaron que la forma de la gota varia en su trayectoria, así como también la masa de la misma, esto implica la necesidad de plantear mejores formas de determinar el coeficiente de arrastre, como es el caso donde se usa un factor de forma del objeto en vuelo.

3.2. FACTORES QUE AFECTAN EL ROMPIMIENTO DEL CHORRO Y FORMACIÓN DE GOTAS.

Los factores que afectan el rompimiento de un chorro, en una cierta distribución de gotas, son varios, pero pueden agruparse en dos formas principales, factores intrínsecos al mismo sistema, como son, la presión, la descarga del aspersor y el ángulo de aspersión, así como factores externos, como el viento, la temperatura, y el medio en que viajan las gotas.

La importancia de la cuantificación de estos factores, de como afectan la

distribución de las gotas, es que inciden directamente sobre la uniformidad de riego, evaporación y la generación de escurrimientos superficiales.

Generalmente, sobre los factores que se puede tener control directo, son los intrínsecos y de manera indirecta se puede disminuir el efecto negativo de los externos. Sin embargo, antes de poder controlarlos, es necesario saber como afecta cada uno de ellos en el rompimiento y distribución de gotas de un chorro de aspersion.

3.2.1. Factores intrínsecos.

3.2.2.1. Presión de operación.

La presión de operación de un espensor, es aquella que se produce, antes de la salida de la boquilla del aspensor. La uniformidad y evaporación de gotas dependen en buena parte de está presión. Su efecto se puede apreciar en la gráfica 2, tomada de Claude H. Pair (1983), en la cual se observan cortes seccionales de la profundidad de agua aplicada, con el incremento de la distancia de la boquilla del aspensor. Se observa que si la presión es muy baja, el chorro de agua no rompe adecuadamente, y se genera un patrón de aplicación en forma de dona (gráf. 2A), esto es debido a que se generan gotas grandes, que viajan lejos del aspensor provocando que en la periferia del diámetro de mojado se generen mayores volúmenes de agua aplicada.

Cuenca R. H. (1989), Menciona respecto a la gráfica 2, que si la presión es muy alta (gráf. 2C), el chorro rompe en excesivas gotas pequeñas, cayendo estas

cerca del aspersor y provocando que no se cubra el diámetro de mojado para el cual fue diseñado el aspersor produciendo mayores volúmenes de agua cerca de la vecindad del aspersor.

Según Jensen M. E. (1983), el comportamiento de los patrones de aspersión de la figura anterior se debe, a que la velocidad del chorro es proporcional a la presión del agua a la salida de la boquilla del aspersor, en presiones altas se producen velocidades altas relativas entre el agua y el aire, resultando en un gran número

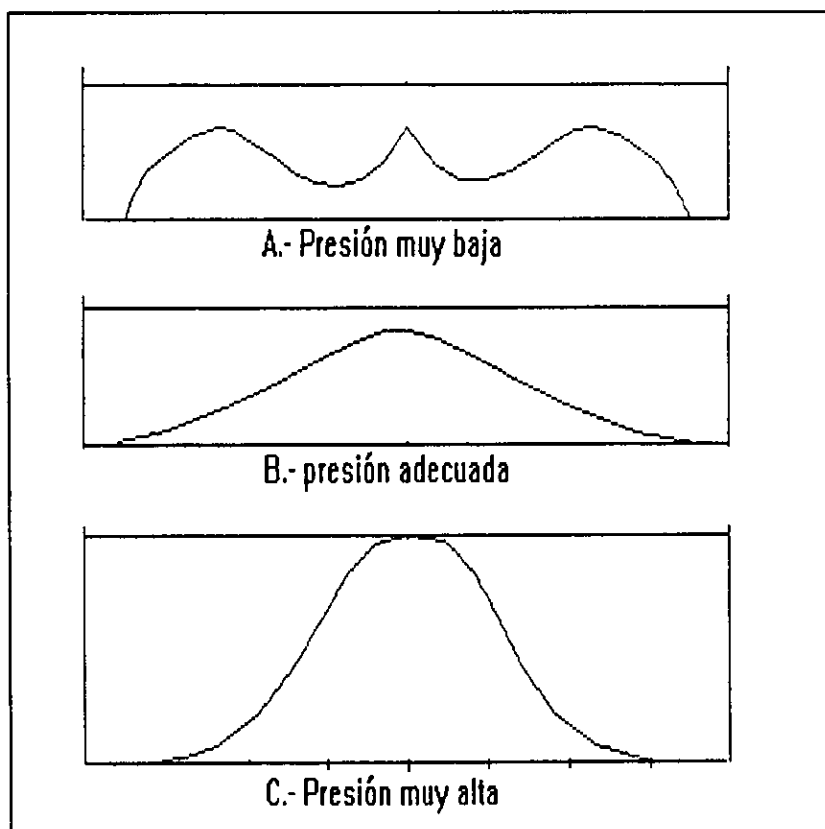


Figura 2. Patrones de aplicación de aspersores individuales, con diferentes presiones (Claude H. P., 1983).

altas relativas entre el agua y el aire, resultando en un gran número de gotas

pequeñas, en presiones bajas, las velocidades relativas entre el agua y el aire son bajas, generando un gran número de gotas grandes.

Con una presión de operación adecuada se genera un rompimiento de gotas uniforme, que produce patrones de aplicación de forma triangular, Cuenca R. H., 1989, (gráf. 2B) estos patrones sencillos al traslaparse con aspersores adyacentes, generan una alta uniformidad de riego, como en la figura 3, que es un patrón sobrepuesto de patrones individuales similares, del tipo triangular. La posición en cada lado de la figura indica las posiciones laterales adyacentes espaciadas a una distancia (Sm) a lo largo de la línea principal.

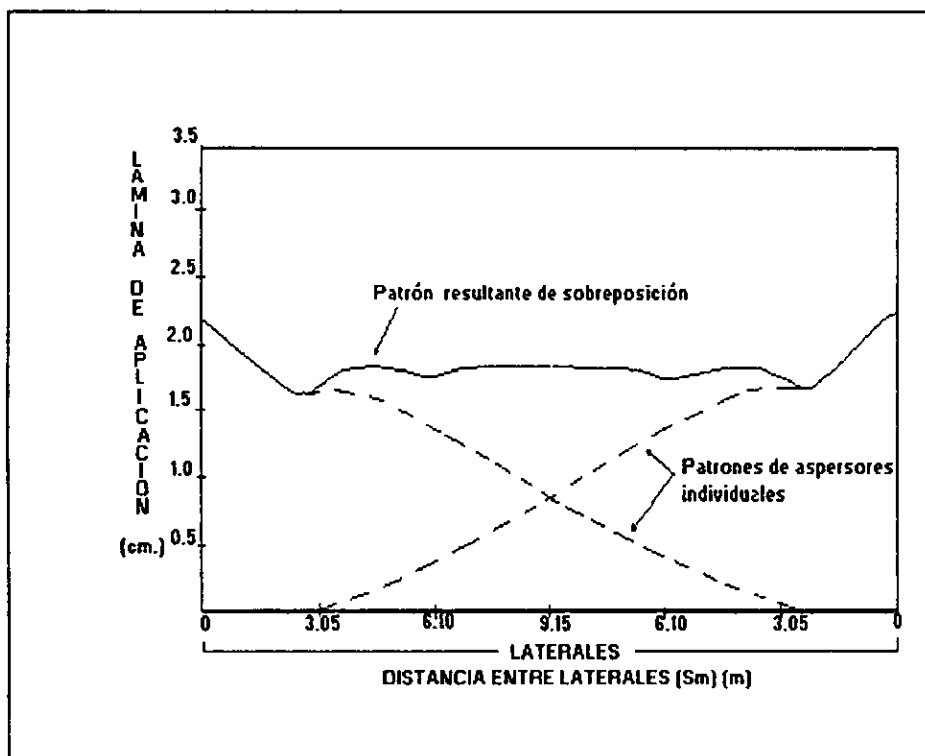


Figura 3. Patrón de aplicación de agua, resultante de la superposición de aspersores laterales, (Cuenca H. R., 1989).

3.2.2.2. Boquilla del aspersor

La combinación de la presión y el diámetro de la boquilla del aspersor, es lo que determina el flujo que transita por un aspersor. Jensen (1983), Menciona que el efecto directo del tamaño de una boquilla en la distribución de gotas es más pequeño que el efecto producido por la presión, en un trabajo donde presenta la distribución del tamaño de gotas para tres tamaños de boquillas operadas a 400 Kpa, encontró que el volumen de gotas grandes se incrementa con el aumento del diámetro de la boquilla y el volumen de gotas pequeñas aumenta con la disminución del diámetro de boquilla. Sin embargo concluye que el efecto es poco significativo.

3.2.2.3. Ángulo de aspersión.

Parece ser que el ángulo de aspersión tiene poco efecto en la distribución de gotas, sin embargo, Soares A. A et al. (1991), observo en uno de sus trabajos, que la uniformidad se incrementa con el aumento del ángulo de proyección de la boquilla. También observo que existe un ángulo de trayectoria que maximiza la distancia de vuelo para un tamaño de gota dado.

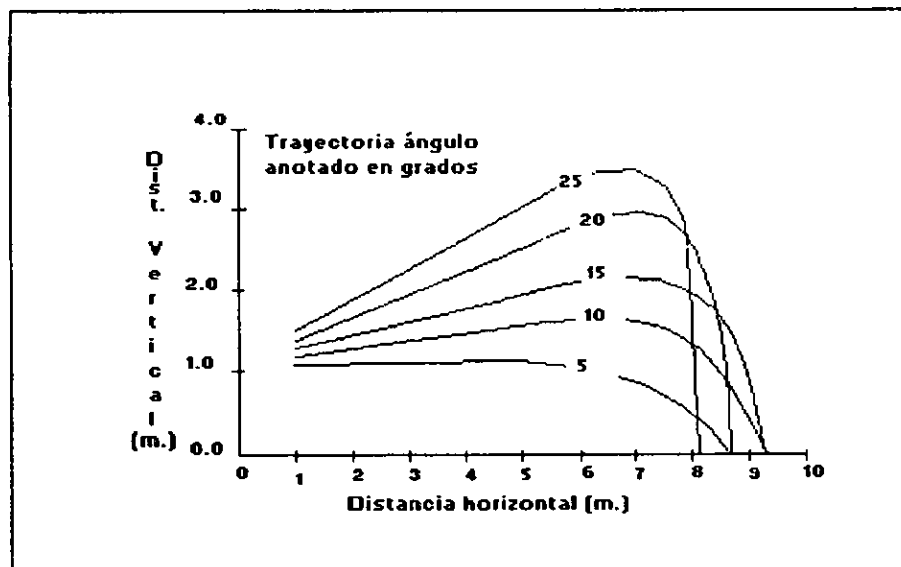
Von Bernuth R. D. (1988), llegó a la conclusión, al probar ángulos desde 5 a 25 grados, con una velocidad de viento de 4 m/s, que la distancia máxima alcanzada por las gotas entre ángulos de aspersión diferentes difiere menos de un metro, gráfica

4. En este mismo trabajo, encontró que el máximo radio de vuelo para ángulos de trayectorias variables, con velocidades de viento de 8 m/s es una función del tamaño de gotas y la velocidad del viento.

3.2.2. Factores externos.

3.2.2.1. Condiciones de viento.

El viento es uno de los factores que más afectan el buen desempeño de un aspersor agrícola, para su análisis, este tiene que ser interrelacionado con los factores



Gráfica 4. Trayectoria de gotas de 3.4 mm. de diámetro, velocidad de viento de 4 m/s y presión de operación de 400 Kpa. (Von Bernuth R. D. ,1988).

intrínsecos al aspersor, presión, tamaño de boquilla y ángulo de trayectoria.

Las condiciones de viento prevalecientes, tienen un fuerte efecto en los patrones de aplicación del aspersor. Cuenca (1989), menciona que en lugares con condiciones de vientos muy fuertes, se ve limitado el uso de sistemas de aspersión, a tiempos cortos donde se presenten velocidades relativas bajas de los vientos, como puede ser por la noche. Bajo condiciones de no viento, los patrones de aplicación, si se tiene una adecuada presión, son concéntricos, en el caso contrario los patrones de aplicación son distorsionados fuertemente, como los ejemplos mostrados en las figuras 4 y 5.

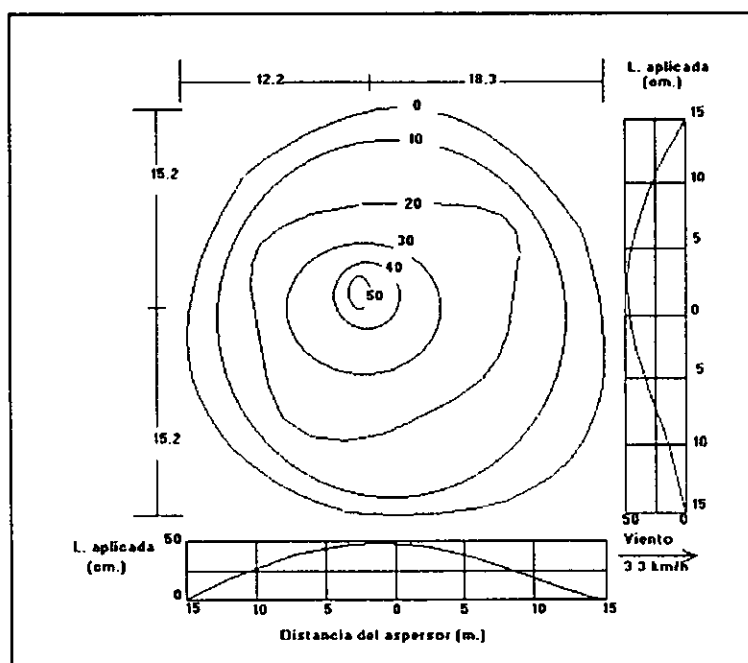


figura 4. Efecto de condición de viento con velocidad baja en un patrón de distribución de agua aplicada (Cuenca, 1989).

El viento como tal, tiene que ser analizado desde dos puntos de vista, de la velocidad y de la dirección en que este golpea el chorro de aspersión.

Von Bernuth R. D. (1988), observó que la distribución de gotas cuando no hay viento es semejante a una curva exponencial gráfica 5, cuando se tiene presencia del viento se presenta mayor número de gotas pequeñas, porque, aumenta la fuerza de arrastre.

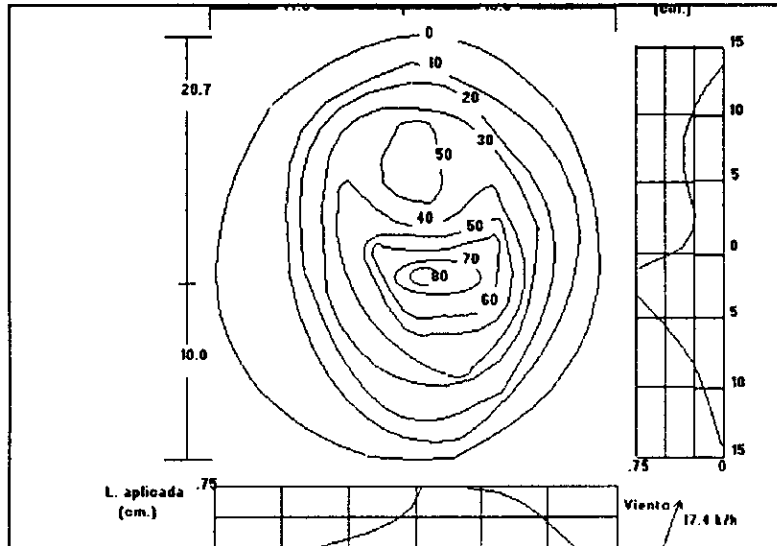
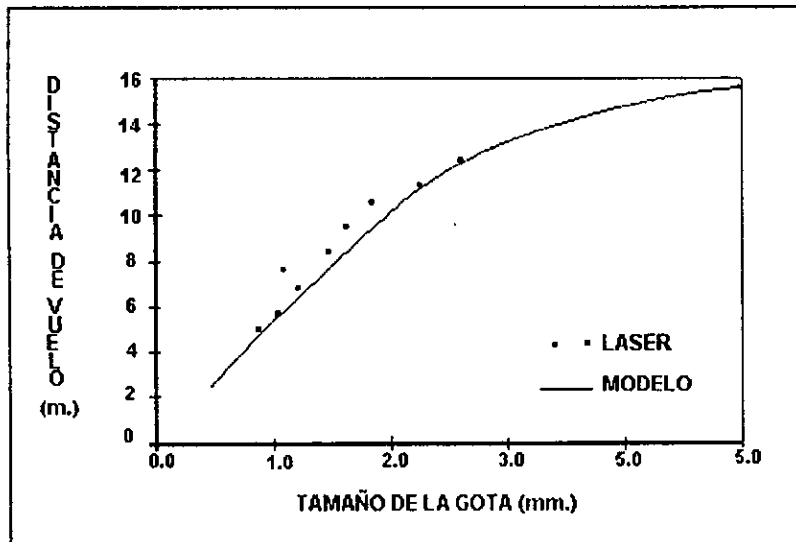


Figura 5. Efecto de velocidad de viento alta en un patrón de distribución de agua aplicada (Cuenca , 1989).



Gráfica 5. Volumen medio de tamaño de gotas vs. distancia (Von Bernuth, 1988).

Vories E. D., Von Bernuth R. D. (1986), investigaron el efecto del viento en el máximo radio de alcance para un diámetro de boquilla de 3.97 mm. y una presión de operación de 400 kpa. demostró la variación de los máximos radios generados para un viento opuesto, un viento paralelo y un viento cruzado a la trayectoria del chorro. Se encontró que el radio menos afectado es el de viento perpendicular al chorro a un para diferentes velocidades de viento, el radio para vientos opuestos al chorro acortó con la velocidad del viento y para vientos paralelos el radio se incremento con los aumentos de las velocidades de los viento.

Se puede decir, en forma general que el viento distorsiona el patrón de aplicación del agua y que si este es directamente opuesto a la trayectoria del chorro, se produce un rompimiento más rápido del chorro con un incremento en el tamaño de gotas pequeñas, y en viento paralelo al movimiento de las gotas, el rompimiento del chorro es menor, provocando un aumento en gotas grandes y encontrando además, menor resistencia al viaje de la gota lo que hace avanzar a las gotas mayor distancia del aspersor.

3.3. EFECTO DEL ROMPIMIENTO DEL CHORRO Y FORMACION DE GOTAS EN PARAMETROS DE RIEGO.

3.3.1. Uniformidad de riego.

El objetivo de un sistema de riego por aspersion, es el de distribuir el agua de riego en una forma uniforme en la superficie del suelo irrigado, una aplicación desuniforme, resulta en pérdidas económicas importantes, provocando además

pérdidas de suelo, encostramiento e incluso evaporación de gotas pequeñas.

Ken Solomon (1979), menciona que Christiansen (1942), estudió los patrones de distribución de agua de los aspersores y desarrolló una expresión matemática como un índice de la uniformidad de riego conocido como coeficiente de uniformidad, ecuación 24.

$$CU = 100 \left(1 - \frac{\sum |P_i - P_a|}{(N) (P_a)} \right) \quad (\text{Ec. 24})$$

Donde:

CU = coeficiente de uniformidad, %

P_i = la precipitación de agua en el punto i , mm;

P_a = la precipitación media, mm

N = al número de puntos de malla espaciados regularmente.

Soares A. A. (1991), menciona que existen muchos factores que afectan la distribución del agua en el suelo pero que pueden ser agrupados de la siguiente manera:

Factores de distribución del sistema: Espaciamiento.

Factores climáticos: viento, temperatura

Factores de operación del sistema: presión, boquilla y ángulo de trayectoria.

Sin embargo pueden ser, incluso, más factores, como la pendiente del suelo y la inclinación del elevador del aspersor, la humedad relativa. En un trabajo en donde se probaron diferentes pendientes del terreno, ángulos de posición del elevador, ángulos de trayectorias y diferentes patrones de aspersión; con relación al coeficiente de uniformidad se observó, con respecto a la pendiente del terreno, que en todos los casos la uniformidad de riego mejora cuando el terreno tiene menor pendiente; Con relación a la posición del elevador encontró, que la mejor uniformidad de riego se presenta en donde la posición del elevador es perpendicular a la superficie del suelo; con relación al ángulo de aspersión se encontró que la uniformidad de riego no varia en terrenos con poca pendiente y elevador perpendicular a la superficie del suelo.

Según las normas ISO 7749.2, parte 2 (1990), existen diferentes métodos para evaluar la uniformidad de riego o mejor dicho determinar el coeficiente de uniformidad, hay pruebas que determinan el coeficiente de uniformidad tomando en cuenta los patrones de aplicación de agua y pruebas que se hacen para un solo aspersor y que luego de forma indirecta pueden usarse para sobreponer patrones de aplicación de agua, éstos métodos son también conocidos como pruebas sencillas de aspersión, pueden ser de dos tipos:

Método de campo de círculo completo: propio para condiciones de campo, básicamente consiste en generar una red de colectores de agua equidistante alrededor del aspersor, de tal forma que cubra su máximo diámetro de mojado y mediante la formula de Christiansen determinar el C. U.

Método radial: Propio para condiciones de laboratorio, Este consiste básicamente, en colocar una línea de colectores dispuesta radialmente al círculo de

aspersión, después a partir de este eje de colectores interpolar para obtener datos de cuando menos el equivalente a un cuarto de círculo, y asegurar una representatividad estadística, consecuentemente con la fórmula de Christiansen calcular C. U.

3.3.2. Efecto del impacto de las gotas en la superficie del suelo.

La velocidad con que se impacta un cierto tamaño de gota en el suelo, puede generar un sellado de la capa superficial que reduce la velocidad de infiltración, provocando encharcamientos y escurrimientos superficiales del agua aplicada.

Jensen (1983), Wen-Juar y David J. Hills (1993), explican que las causas por las cuales es importante estudiar la distribución de gotas de un chorro de aspersor, es porque, una mala operación del aspersor puede generar cantidades de gotas grandes, que poseen grandes cantidades de energía cinética provocando el sellado de la capa superficial del suelo

David D. Bosch y Charles a Onstad (1986), dicen que el sellado parcial de la superficie del suelo ocurre cuando los agregados del suelo rompen debido a la energía de la lluvia de gotas, y que después de que el rompimiento ocurre, las partículas disgregadas forman una capa compacta en la superficie del suelo, reduciendo la conductividad hidráulica de esta capa.

El problema se reduce a encontrar una relación o función, que nos permita determinar cuánto disminuye la velocidad de infiltración, el enfoque para estudiarlo ha sido básicamente experimental.

Von Bernuth R. D. y Gilley J. R. (1985), presentan un desarrollo donde introducen una función de reducción de la velocidad de infiltración (R), en la ecuación de Green y Ampt modificada por Keller y Hachun (1978), para suelos con superficie encostrada, tal desarrollo es el siguiente.

Partiendo de:

$$I(t) = K_h (1 + PWZ) \quad (Ec. 25)$$

Donde:

$$K_h = \frac{z K_s}{S Rr + Z - S} \quad (Ec. 26)$$

$I(t)$ = Velocidad de infiltración como función del tiempo, cm/h.

K_h = Conductividad hidráulica media armónica, cm/h.

PW = Succión del suelo en el frente de mojado, cm.

R_r = cociente de conductividad hidráulica de la capa sellada con la del suelo.

S = Espesor de la capa sellada, cm.

Z = Profundidad que el frente de mojado ha avanzado, cm.

La reducción de la velocidad de infiltración es definida por la ecuación 27

$$R = \left(\frac{i_p - i_b}{i_p} \right) 100 \quad (\text{Ec. 27})$$

Donde:

R = Reducción de la velocidad de infiltración comparado con un suelo protegido, %.

i_p = Velocidad de infiltración en un suelo protegido, cm/h.

i_b = Velocidad de infiltración en un suelo desnudo, cm/h.

La ecuación 27 puede ser escrita como $i_b/i_p = 1 - R/100$, la ecuación de Green y Ampt sin reducción de infiltración es

$$i(t) = K_s (1 + PWZ) \quad (\text{Ec. 28})$$

Donde:

K_s = Conductividad hidráulica de el suelo, cm/h. La velocidad de infiltración dada por la ecuación 1, es equivalente a i_b . Sin embargo, la razón de la velocidad de infiltración de un suelo desnudo sobre un suelo protegido está dada por.

$$i_b/i_p = [K_h (1 + PWZ)] / [K_s (1 + PWZ)] \quad (\text{Ec. 29})$$

que se reduce a

$$i_b/i_p = K_h/K_s \quad (\text{Ec.30})$$

solucionando para K_h tenemos:

$$K_h = K_s(1 - R/100) \quad (\text{Ec.31})$$

La conductividad hidráulica armónica, dada por la ecuación 26, depende del espesor de la capa sellada, de la conductividad hidráulica de la capa sellada y de la profundidad del frente de mojado, sin embargo, cuando se aplica la ecuación de reducción de la infiltración 27, no se hace necesario que los valores anteriormente mencionados, sean conocidos, las propiedades del sellado son incorporados en términos de la ecuación 27, sustituyendo la ecuación 31 en la 25 resulta:

$$I(t) = K_s(1 - R/100) (1 + PWZ) \quad (\text{Ec. 32})$$

Varios autores han tratado de encontrar una función de reducción (R), Von Bernuth,(1982), determino una ecuación para R, a partir de datos de Ellison y Slater, Levine yStrong está es como sigue:

$$R = 3.541 d^{0.683} V^{1.271} S_a^{0.353} S_i^{0.237} \quad (\text{Ec. 33})$$

La presentación de la ecuación 33 tiene características importantes, que usa diámetro de gota y velocidad de la gota en el instante que toca la superficie del suelo, datos que pueden ser obtenidos por las ecuaciones de la teoría balística.

Otros autores como Van Doren y Allmaras (1978), han desarrollado ecuaciones que dan un valor directo de la conductividad hidráulica de la superficie sellada.

$$Kt = K_b \exp(-C(1 - Fr) E) \quad (\text{Ec. 34})$$

Donde:

Kt = Conductividad hidráulica de la superficie sellada en el tiempo, (m/s).

K_b = Es la conductividad hidráulica de la superficie sellada inmediatamente después de la más reciente cultivada, (m/s)

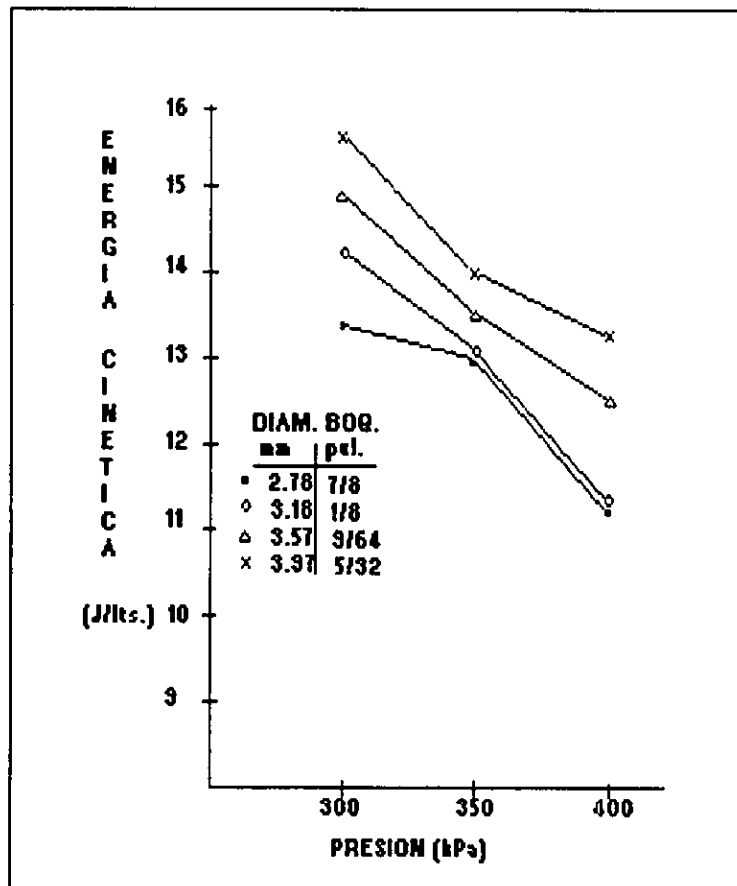
C = Es la constante de estabilidad estructural de el suelo, (cm^2/J).

Fr = Fracción del suelo cubierta por residuos de cultivos

E = La energía cinética de la lluvia acumulada (J/cm^2).

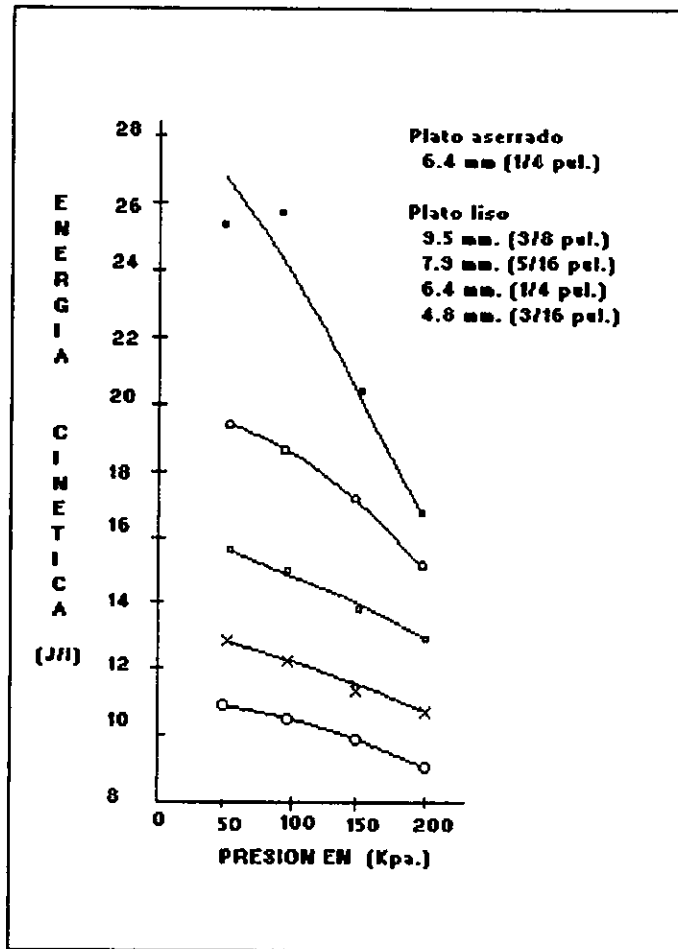
Esta forma de las ecuaciones involucran la energía cinética, generada por un volumen de agua que se impacta en el suelo, la dificultad de las mismas, es la obtención de los parámetros K_b , C , Fr .

Jensen M. E. (1983), Usando datos de Schladerbusch y Czeratsk (1957), de distribución de gotas y el método de Seginer (1965), para calcular la velocidad de gotas grandes, presenta valores de energía cinética de una aplicación de 1 mm. de profundidad de agua en 1 m^2 gráfica 6, donde se observa el efecto del tamaño de la boquilla y presión. Se ve que a presiones altas se generan cantidades de energía cinética bajas, esto debido a la alta generación de gotas pequeñas y en presiones bajas los valores de energía cinética son altos, debido a la alta generación de gotas grandes, las cuales tienen mayor masa y mayor velocidad de impacto.



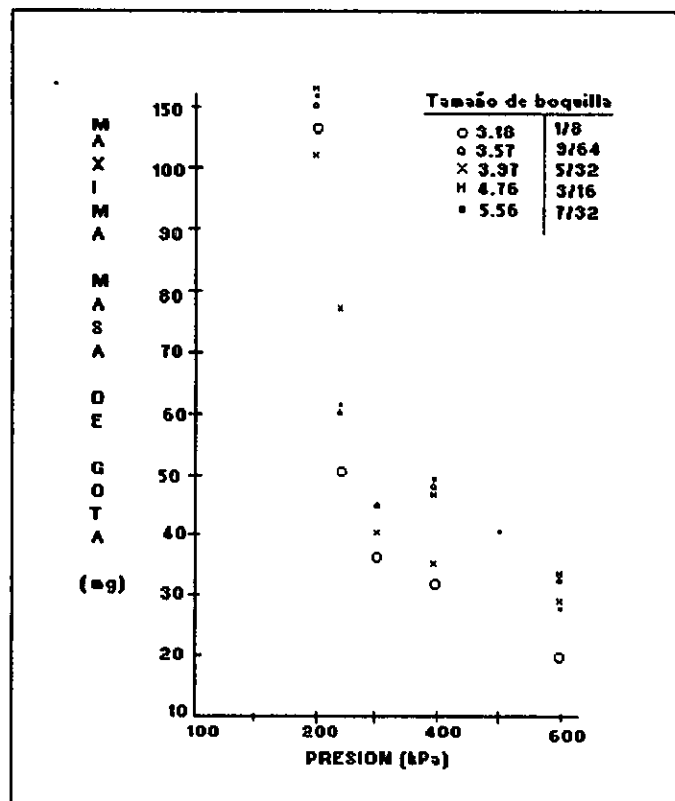
Gráfica 6. Distribución de energía cinética para tamaños de gotas, como función de la boquilla y presión (Jensen, 1983).

Robert A Kohl, Darrel W. De Boer, Paul D. Evenson (1985), en un estudio observaron el efecto del tamaño de boquilla y presión de agua en la producción de Energía cinética, en aspersores tipo spray con placas lisas y placas aserradas de baja presión, gráfica 7, donde la energía cinética es presentada en J/l, también en este trabajo se observó que a bajas presiones se generan altas cantidades de energía cinética y altas presiones se generan cantidades pequeñas de energía cinética. Existe también una gran variación entre curvas por el tamaño de boquilla, incrementandose la energía cinética con aumento del tamaño de la boquilla.



Gráfica 7. Energía cinética para diferentes presiones y tipos de aspersores (Kohl, De Boer y Evenson, 1985).

Jensen M. E. (1983), presenta una gráfica (8), generada por Kohl (1974), donde el tamaño de la boquilla y presión en la máxima masa de gota producida por diferentes tamaños de gotas es similar sobre varios tamaños de boquillas pero muy sensitiva al cambio de presión.



Gráfica 8. Máxima masa de gotas producidas por varios tamaños de boquillas operando a diferentes presiones (Jensen, 1983).

los trabajos anteriores muestran la importancia de tener una adecuada presión en los aspersores, para evitar el aumento del tamaño de gotas y consecuentemente controlar el sellado del suelo.

3.3.3. Pérdidas por evaporación de agua del aspersor.

Es difícil cuantificar cuanta es el agua que se evapora en la atmósfera al salir de la boquilla, es más difícil todavía, cuantificar cuanta agua se evapora para cada

diferente tamaño de gotas. Cuenca (1989), menciona que no hay duda, que la evaporación toma mayor fuerza cuando las gotas que salen de la boquilla del aspersor son muy pequeñas, esto, debido principalmente a que la sumatoria de todas las gotas pequeñas generan mayor cantidad de área superficial expuesta a la radiación solar, menciona la importancia de tener también una presión adecuada para evitar grandes volúmenes de gotas pequeñas.

3.4. RESUMEN DE ANTECEDENTES

Las causas por las que se debe estudiar el rompimiento del chorro y formación de gotas de un aspersor agrícola según, Jensen M. E. (1983) y Von Bernuth et al (1984), son las siguientes:

1. A que cuando se producen muchas gotas de tamaño pequeño estas se ven sujetas a la velocidad del viento, lo cual provoca que sean arrastradas y caigan distantes del lugar donde deberían de caer, esto distorsiona los patrones de aplicación del agua, con una consecuente baja en la uniformidad de riego.

2. Porque cuando se producen muchas gotas de tamaño grande, estas poseen gran cantidad de energía cinética la cual es transferida al suelo al impactarse con el mismo, provocando el sellado superficial del suelo, lo cual genera escurrimientos afectando la uniformidad de aplicación del riego.

3. Dependiendo del tamaño de las gotas que se generen, también dependerá la mayor o menor evaporación de las mismas .

La forma en que se ha tratado de estudiar el rompimiento y formación de gotas de chorros de aspersión, son por medios analíticos-numéricos y por medio de la experimentación a nivel de laboratorio.

Los estudios analíticos-numéricos se han basado en las ecuaciones dinámicas de la teoría balística (E.c. 5a, 5b y 5c), las cuales se basan en la segunda ley de Newton, en estas ecuaciones se hace semejanza de la trayectoria de un proyectil con la trayectoria que sigue una gota al salir del aspersor; en ellas se asume que la fuerza de resistencia al movimiento de las gotas es proporcional a la segunda potencia de la velocidad, $f_r = Cv^2$ donde C es un coeficiente de proporcionalidad, Grant R. F. (1962), del cual existen varias formas de determinarlo, pero que no ha sido posible determinar con mucho apego a la situación física del fenómeno.

Se han desarrollado soluciones analíticas como la de Thooyamani K. P. Y Norum D.J. (1989) en términos adimensionales (ec. 6 a 15), considerando que las gotas alcanzan su velocidad terminal antes de que se impacten en el suelo, este criterio posiblemente sea aplicable al uso de grandes cañones de riego. El desarrollo de soluciones numéricas han dado mejores resultados, como la que se desarrolla en el presente trabajo.

En los estudios experimentales se ha tratado de captar como es el proceso de rompimiento y formación de las gotas, con el uso de cámaras fotográficas y cámaras de videograbación de alta velocidad, que se hacen a lo largo de la trayectoria de recorrido de las gotas, posteriormente son analizadas.

El problema del estudio del fenómeno, radica en la dificultad para poder medir

y evaluar los diferentes factores que intervienen en el rompimiento y formación de gotas; estos factores pueden ser intrínsecos al aspersor como son la presión de operación, la boquilla del aspersor y el ángulo de aspersión; y externos al aspersor como son el viento, temperatura, humedad del ambiente, la pendiente del terreno.

Por último es importante mencionar que la lluvia que se provoca con el aspersor, incide en la formación de costra superficial o sellado del suelo, existe una buena cantidad de estudios relacionados con el mismo, se ha logrado desarrollar ecuaciones (Ec. 32, 33 y 34) como la de Von Bernuth (1982) que relaciona directamente el tamaño de la gota y su velocidad al momento de impactarse en el suelo.

IV. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO.

4.1. SITUACIONES DEL ESTUDIO.

El trabajo desarrollado comprende el desarrollo de tres etapas:

1. Obtención de datos experimentales a nivel de laboratorio del rompimiento y distribución de gotas de un aspersor agrícola.
2. La solución de las ecuaciones de la teoría balística aplicadas al rompimiento en gotas de un chorro de aspersor agrícola, mediante método numérico de Runge Kutta de cuarto orden.
3. La comparación de los datos experimentales con datos generados por el modelo balístico y su aplicación en el sellado superficial del suelo.

4.2. OBTENCIÓN DE LOS DATOS EXPERIMENTALES.

El trabajo experimental fué desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), ubicado en Jiutepec, Morelos, para condiciones de operación del aspersor de no viento.

4.2.1. Equipo e instalación para la obtención de datos experimentales.

4.2.1.1. Instalación del aspersor.

El aspersor usado en este trabajo fue un aspersor Modelo Naan 322/94, con ángulo de trayectoria de 11° de una sola boquilla de un diámetro de 2.8 mm., con una

amplitud de operación recomendada desde 15 a 40 m.c.a. y de 16 a 21 m. de diámetro de mojado. La instalación del mismo fue hecha bajo las especificaciones ISO 7749-2 (1990), figura 6, para la realización de pruebas sencillas de aspersión por el método radial, se le suministro presión a través de una bomba eléctrica de 1/4 de H.P. de 3450 RPM., se protegió el aspersor con un tubo de PVC como se muestra en la foto 1, para evitar afectar instalaciones del laboratorio y el equipo de filmación se hizo al tubo una ventana, a la altura del aspersor, que permitía la salida del agua en forma de chorro, en una sola porción de circunferencia que correspondía a la línea de botes colectores de la prueba de aspersión.

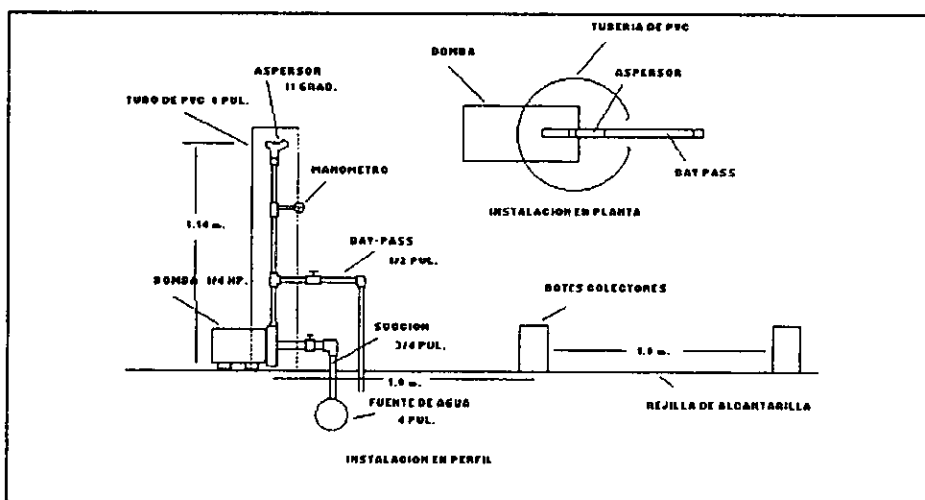


Figura 6. Esquema de instalación del Aspersor.

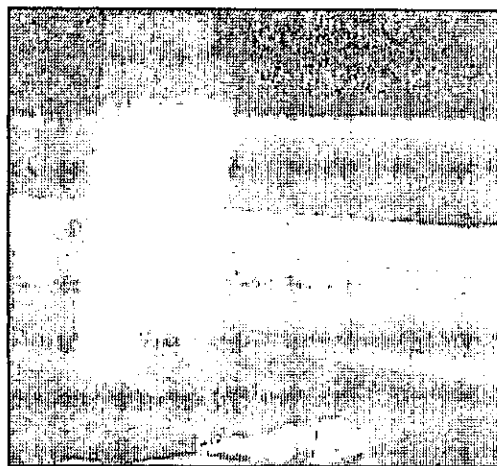


Foto 1. Instalación del aspersor.

4.2.1.2. Equipo para grabaciones de imágenes de distribución de gotas del aspersor.

Para la grabación se uso un equipo de videograbación de alta velocidad, Marca KODAK-EKTAPRO, perteneciente al laboratorio de hidráulica del I.M.T.A. foto 2, Este equipo de videograbación transfiere la información a una interfase gráfica (Transfer Utility) que permite a través de funciones en pantalla del monitor de la interfase, trabajar con las imágenes para obtener filmaciones de alta calidad , foto 3.

Con el Equipo KODAK-EKTAPRO, una vez obtenida la filmación deseada, digitaliza las imágenes, que luego pueden ser analizadas por diferentes programas computacionales, como son el MAP (Motion Analysis Package) y el MAW (Motion Analysis Workstation), Programas pertenecientes al I.M.T.A. y que fueron utilizados en este trabajo.

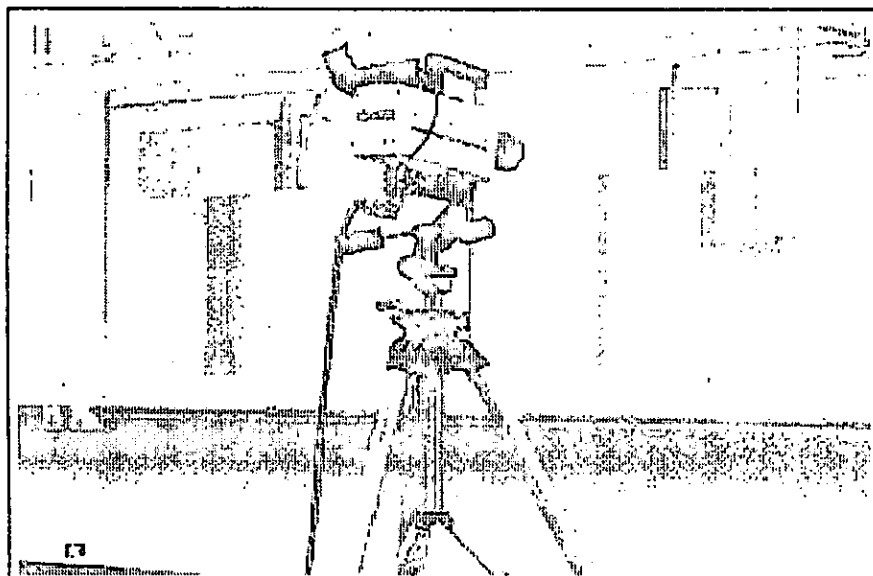


foto 2. Camará de filmación de alta velocidad del equipo Kodak-Ektapro.

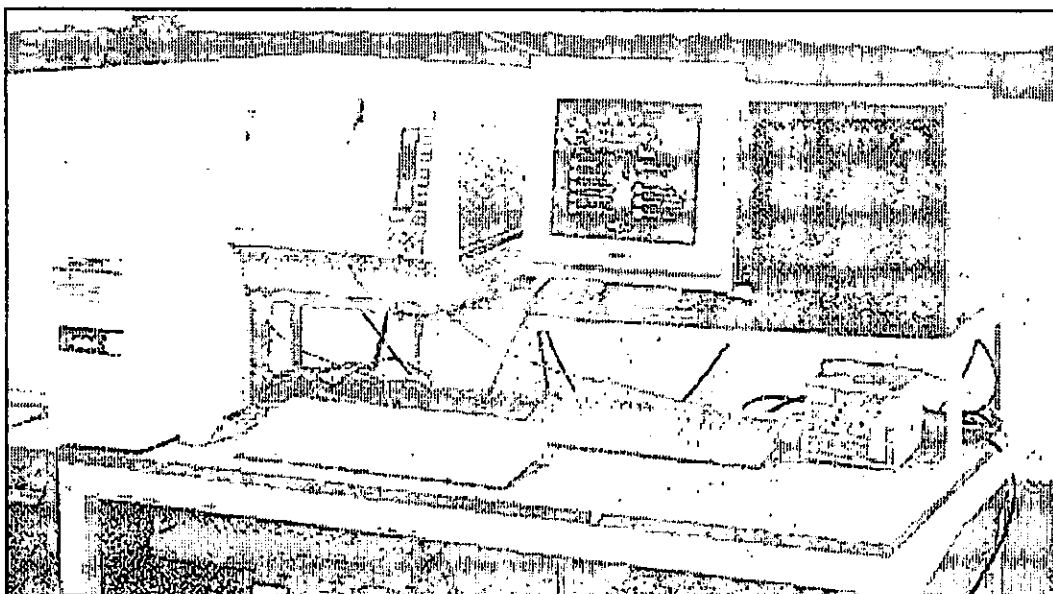


foto 3. Monitor y modulo central de procesamiento del equipo Kodak-Ektapro, así como la computadora personal usada para el análisis de imagenes.

4.2.2. Prueba sencilla de aspersión.

Antes de hacer la filmaciones, se hicieron pruebas sencillas de aspersión, con la finalidad de determinar la uniformidad de riego, estas pruebas se hicieron para las presiones de operación seleccionadas para las filmaciones, que son 10, 15 y 20 m.c.a., de estas presiones dos están dentro del rango de recomendación del fabricante (15 y 20 m.c.a.).

El método usado para la prueba de aspersión fue el método radial, el desarrollo de la prueba e instalación fue basado en las especificaciones de la ISO 7749-2 (1990). El tamaño de los colectores usados fue de 15 x 10 cm. y una separación entre colectores de 1 m., la altura del aspersor fue a 1.14 m., figura 6.

El método radial, consiste en localizar los colectores en una línea dispuesta radialmente al aspersor, foto 5, de tal forma que cubra el diámetro de mojado,



foto 5. Colocación de los colectores para la prueba de aspersión.

este método se usa para condiciones de no viento, la duración de la prueba no debe ser menor de 1 una hora.

Cuando la prueba termina, a partir de los datos de los colectores dispuestos en una línea radial, se generan datos artificiales por interpolación, suponiendo el método de campo, figura 7, está malla artificial tiene el mismo espaciamiento que la de los colectores de prueba, y que después tomando como pivote el aspersor, se

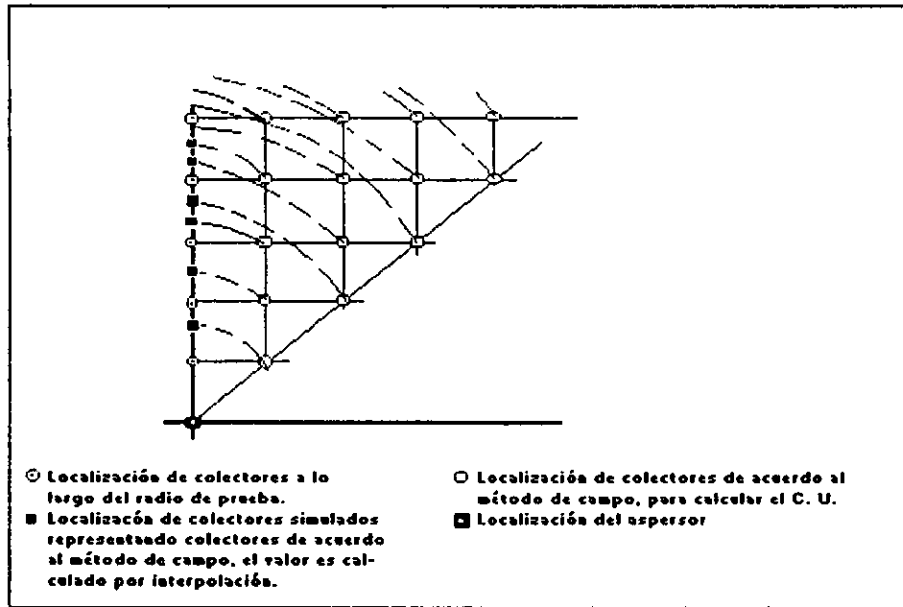


Figura 7. Esquema de localización de colectores para el método radial, y colectores generados como si fuera el método de campo.

trasladan hacia la línea de los colectores de prueba, con todos los datos reales y artificiales se calcula el coeficiente de uniformidad de Christiansen (C.U.), definida anteriormente.

$$CU = 100 \left(1 - \frac{\sum |P_i - P_a|}{N P_a} \right) \quad (Ec. 35)$$

para el caso del trabajo, se desarrolló un programa computacional RADIAL.BAS (Diagrama de flujo Fig. 8) que a partir de los datos de prueba, genera los demás datos y calcula el C.U. de Christiansen, la técnica de interpolación que usa el programa, son los polinomios interpolantes de Lagrange, Burden L. y Douglas F. J. (1985), el cual se define por el siguiente Teorema.

Si X_0, X_1, \dots, X_n son $(n + 1)$ números diferentes y f es una función cuyos valores

se conocen en estos puntos, entonces existe un polinomio de P de grado a lo más n con la propiedad de que $f(X_k) = P(X_k)$ para cada $k = 0, 1, \dots, n$; donde:

$$F(x) = \sum_{k=0}^n f(X_k) L_{n,k}(X) \quad (\text{Ec. 36})$$

$$L_{n,k}(x) = \prod_{i=0, i \neq k}^n \frac{(x - x_i)}{(x_k - x_i)} \quad \text{para cada } k = 0, 1, \dots, n, \quad (\text{Ec. 37})$$

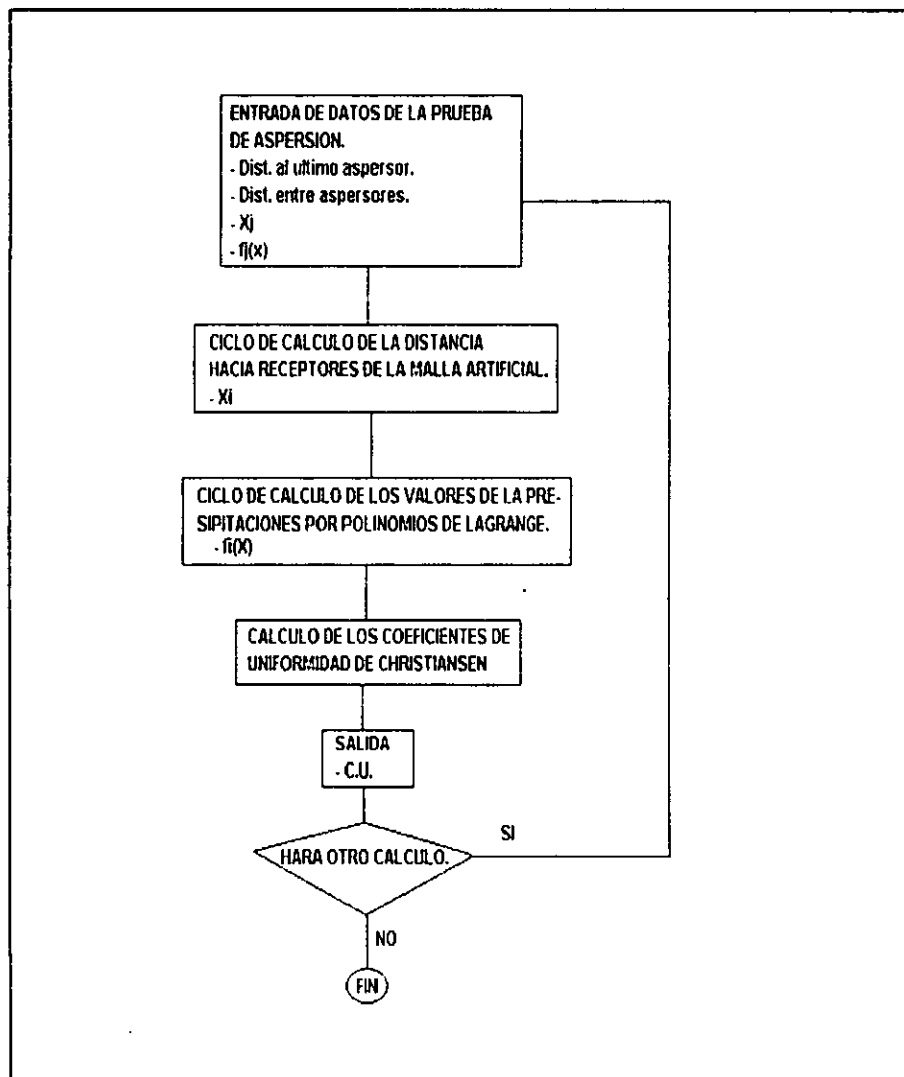


Figura 8. Diagrama de flujo del programa RADIAL.BAS.

Los datos de precipitación de la prueba fueron obtenidos en mililitros con una probeta con precisión a un mililitro, fueron transformados a lámina precipitada por la relación de áreas de la abertura del colector con la abertura de la probeta.

4.2.3. Videograbación de la distribución de gotas del aspersor.

El equipo usado para las filmaciones fue el de alta velocidad mencionado en el inciso 4.2.1.2, fue necesario fijar el movimiento de giro del aspersor tratando de no afectar el golpe de torque, la finalidad, fue tener un chorro continuo que permitiera tener secuencia en las filmaciones, el aspersor se protegió con un tubo de PVC de 10 pul. de diámetro, para evitar algún posible accidente que dañara la cámara de filmación, en el tubo se hizo una abertura a la altura de la boquilla del aspersor (1.14 m) de 14 de altura por 8 cm de ancho, de tal forma que no perturbara el chorro de aspersión, la verificación de que esto no sucediera fue de manera visual, se hizo otra abertura al tubo de PVC. que permitiera tomar lecturas del manómetro, para controlar la presión de operación se instaló un Bay-pass en la tubería del aspersor.

4.2.3.1. Planeación de la filmación de gotas.

Las filmaciones se hicieron por la noche, para obtener contraste en las gotas del chorro con la iluminación de las lámparas, las cuales eran dirigidas en forma encontradas al área de filmación, La cámara fue colocada en forma perpendicular al chorro a una distancia del área de filmación que oscilo entre 75 y 90 cm., el área de filmación era pequeña de aproximadamente 11 x 6 cm. de área, la profundidad pequeña de enfoque de filmación permitió que prácticamente las tomas se hicieran en un plano; la altura de las filmaciones fue aproximadamente a 20 cm. de la superficie

del suelo, figura 9.

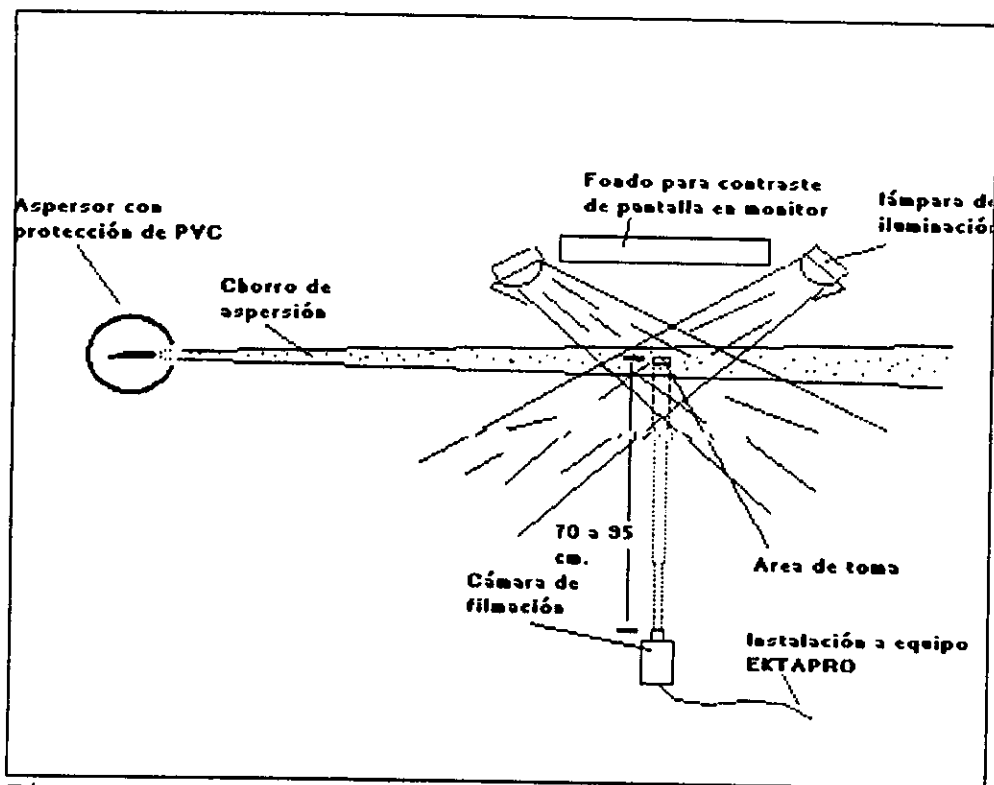


Figura 9. Forma y colocación del equipo de filmación de la distribución de gotas.

Las tomas que se hicieron, fueron para tres presiones de operación y para tres posiciones a lo largo de la trayectoria del chorro, como se muestra en la tabla 3, en cada toma, que representa una área de 10 x 6 cm., se generaron los archivos de gotas que después serían analizados, se hacía un muestreo en cada toma obteniendo

PRESIÓN (mca)	POSICIÓN 1 (m)	POSICIÓN 2 (m)	POSICIÓN 3 (m)
10	2	5	7
15	2	5	8
20	2	5	8

Tabla 3. Distribución de las filmaciones de la distribución de gotas.

las gotas que representaban la variación del tamaño en cada posición.

4.2.3.2. La Cámara y forma como se filmo.

Como se menciona anteriormente las tomas en las diferentes posiciones se digitalizaron por medio del equipo KODAK-EKTAPRO para ser analizadas posteriormente. El equipo de filmación consta basicamente de tres partes.

La Cámara, que tiene la capacidad de captar imágenes a alta velocidades, equipada con juegos de lentes para hacer acercamientos de la imagen, así como captar objetos muy pequeños.

Una interfase gráfica, que consta de un monitor y un procesador que permite la digitalización de las imágenes y creaciones de archivos que luego pueden ser analizados por programas comerciales.

Una tercera parte que es una computadora personal, donde se analizan las imágenes con los programas, en este caso el MAP y el MAW.

Para que el equipo pueda funcionar adecuadamente en la filmación de los chorros de aspersión, se tiene que cumplir con ciertas condiciones del escenario de filmación.

Distancias de enfoque, se tiene que tomar en cuenta dos situaciones, una la distancia a la que se pondrá la cámara como se muestra en la figura 9, de tal forma que permita visualizar las gotas, sin que a esta la caiga el rocío del chorro del aspersor, cabe mencionar que para evitar alguna contrariedad de este tipo, a la cámara se le colocó una protección de plástico; la distancia del foco de la cámara a la línea media del chorro de aspersión fue de 70 a 95 cm. La otra situación es

controlada con el lente de la cámara de enfoque, de tal forma que la profundidad de filmación fuera la más pequeña posible, con la finalidad de que las gotas filmadas, prácticamente se presenten en un plano vertical, esta profundidad de filmación que se obtuvo en este trabajo fue de aproximadamente 2 cm., y el área de filmación representaba aproximadamente 66 cm² (6 x 11 cm).

Es necesario aclarar que seguir realmente la trayectoria del chorro y en particular de una gota es prácticamente imposible, está y el hecho de que lo importante era la distribución de gotas que llegaban a la superficie del suelo, decidió que la filmaciones se hicieran a 20 cm. de la superficie del suelo (fig. 9) y en distancias a partir del aspersor como las mostradas en la tabla 3.

Iluminación, en el trabajo que realizo Derrel L. Martin, Richard Hawkes y George Meyer (1993), utilizaron para la iluminación lámparas de luz intermitente, que permitia dar la apariencia de suspender instantáneamente el movimiento de la gota, en el laboratorio del IMTA se consiguió una lámpara de este tipo pero la velocidad de intermitencia era muy baja, se opto por probar con lámparas de luz continua de alta intensidad, de las de tipo estudio fotográfico, de estas se colocaron dos, en forma cruzada, como se señala en la fig. 9.

Fondo de la filmación, el objeto de este fondo o pantalla es que junto con la iluminación, se logre un contraste fuerte de las gotas y que se puedan filmar adecuadamente, se probó sin fondo, con un fondo blanco, el que dio mejor resultado fue un fondo azul claro.

Hora de filmación, debido que se quería aprovechar lo mejor posible la

iluminación y el contraste que esta provocaría en las gotas, las filmaciones de planearon hacer cuando estuviera oscuro (de noche), para lo cual se apagaban las luces del área del laboratorio donde estaba instalado el equipo y el aspersor.

4.2.3.3. Los programas MAP Y MAW.

Como se menciona anteriormente, las tomas en las diferentes posiciones y su digitalización fue por medio del equipo Kodak - Ektapro, las cuales posteriormente fueron analizadas por los programas MAP y MAW.

Programa MAP(Motion Analysis Package). Es un programa diseñado para facilitar el manejo de objetos digitalizados que fueron grabados con sistemas de video de alta velocidad. Este programa en particular fue usado para determinar las velocidades absolutas de las gotas utilizando la función Quick Measurements del menú principal del programa, en el cual existe la opción de menú Speed, que permitía determinar la velocidad absoluta de cada gota filmada o grabada, para ello había que indicarle una distancia de referencia, que era igual a la longitud del trayecto de la gota por el campo de filmación, y que se obtuvo mediante una regla que era puesta a la distancia de filmación de esa toma, la cual oscilaba entre 75 y 95, una vez colocada la regla se marcaba el campo de filmación de esa toma que oscilo entre 10 y 12 cm., esta distancia es la que se le proporcionaba al programa y luego mediante el mouse en el monitor se marcaba el inicio del campo de filmación y el final, el cual registraba una distancia en pixeles, a esta distancia, el programa le asignaba la longitud proporcionada anteriormente, con estos datos y las unidades en que se trabajaría, además del tiempo de grabación de las imágenes de cada gota, el programa calculaba las velocidades absolutas de cada una, en el anexo se muestran archivos que generaba el programa.

Programa MAW (Motion Analysis Workstation). Es un programa semejante al MAP, pero es más actualizado y manejable, éste permitió definir de manera mas adecuada el diámetro equivalente de la gota. Para ello primero del menú principal se usaba la función Frame donde se calibraba la unidades de medidas, para ello se daba el nombre de la unidad a usar y el tamaño de la unidad de referencia, que era la longitud del campo focal de la cámara y una posición lineal de referencia, seguidamente del menú principal se usaba la función Tools que mediante el comando Outline se determinaba el área, para ello se hacia el trazo del borde de la gota filmada y automáticamente nos daba el área.

Una vez determinada el área se determinaba el diámetro equivalente de cada gota, para lo cual se hacia suponer que la gota es redonda, lo que facilitaba la aplicación de la formula de calculo de área de un círculo, de donde se despejaba el diámetro, esto se hacia para cada gota seleccionada, tabla 10 del apéndice.

4.3. DESARROLLO DEL MODELO NUMERICO DE LAS ECUACIONES QUE GOBIERNAN LA TRAYECTORIA DE LAS GOTAS

Con las ecuaciones mencionadas en el inciso 3.1.2.1, que se originan a partir de la segunda ley de Newton, y que en su forma diferencial en coordenadas rectangulares tenemos, Para las dirección horizontal (x)

$$d^2x/dt^2 = -Q(dx/dt)^2 \quad (Ec. 38)$$

Y la dirección vertical (y)

$$d^2y/dt^2 = g - Q(dy/dt)^2 \quad (Ec. 39)$$

se generó un esquema numérico, por el método de Runge-Kutta de cuarto orden, considerado como uno de los métodos numéricos más exactos para la solución de ecuaciones diferenciales ordinarias.

4.3.1. Solución de la ecuación de la coordenada horizontal

Para el desarrollo del esquema numérico de Runge-Kutta de cuarto orden en la coordenada horizontal (X), se considera primero una transformación de la ecuación 38, en un sistema de ecuaciones lineales de primer orden, haciendo los siguientes cambios de variables:

$$X_1 = dx/dt \quad X_2$$

$$X_2 = d^2x/dt^2$$

Sustituyendo en la ecuación 38 se nos genera un sistema de ecuaciones de primer orden, ecuaciones 40 y 41 con las condiciones iniciales con respecto al tiempo, que, $X_1'(0) = 0$ y $X_2'(0) = V_{x0}$, donde X_1' representa la distancia de la componente horizontal alcanzada por la gota en el tiempo, X_2' representa la componente de velocidad horizontal en el tiempo, V_{x0} representa la componente de velocidad en la coordenada horizontal a la salida de la boquilla.

$$V_{x0} = V_0 \cos \theta \quad V_0 = Cd \sqrt{2 g H} \quad (Ec. 39)$$

Donde:

V_0 = Velocidad del chorro a la salida de la boquilla del aspersor (m/s)

Cd = Coeficiente de descarga adimensional, considerado como 0.97.

g = Aceleración gravitacional, considerada como una constante con valor de 9.8 m/s^2

H = Carga a la salida de la boquilla en m.c.a.

El sistema de ecuaciones final, es el siguiente:

$$\dot{X}_1 = X_2 \quad (\text{Ec. 40})$$

$$\dot{X}_2 = -g X_2^2 \quad (\text{Ec. 41})$$

Solucionando el sistema para incrementos de tiempo (h) = .005 tenemos

$$X_{1(i+1)} = X_{1i} + (h/6) (k_{11} + 2k_{12} + 2k_{13} + k_{14})$$

$$X_{2(i+1)} = X_{2i} + (h/6) (k_{21} + 2k_{22} + 2k_{23} + k_{24})$$

$$k_{11} = f_1(t_i, X_{2i})$$

$$k_{21} = f_2(t_i, X_{2i})$$

$$k_{12} = f_1(t_i + h/2, X_{2i} + k_{21}/2)$$

$$k_{22} = f_2(t_i + h/2, X_{2i} + k_{21}/2)$$

$$k_{13} = f_1(t_i + h/2, X_{2i} + k_{22}/2)$$

$$k_{23} = f_2(t_i + h/2, X_{2i} + k_{22}/2)$$

$$k_{14} = f_1(t, h, X_{2i}, k_{23})$$

$$k_{24} = f_2(t, h, X_{2i}, k_{32})$$

4.3.2. Solución de la ecuación para la coordenada vertical (Y).

Partiendo de la ecuaciones para la coordenada vertical ecuación 39, se convierte en un sistema de ecuaciones de primer orden, mediante el cambio de variables siguiente:

$$Y_1 = dy/dt \quad Y_2 \quad (Ec. 42)$$

$$y_2 = d^2y/dt^2 \quad (Ec. 43)$$

sustituyendo nos genera el siguiente sistema de ecuaciones

$$Y_1 = Y_2 \quad (Ec. 44)$$

$$Y_2 = g - Q Y_1^2 \quad (Ec. 45)$$

Donde Y_1 representa la distancia vertical alcanzada por la gota en el tiempo, Y_2 representa la velocidad vertical de la gota en el tiempo, las condiciones iniciales de que $Y_1(0) = 0$ y $Y_2(0) = V_{yo}$, donde:

$$V_{yo} = V_o \text{ sen } \theta \quad (Ec. 46)$$

La componente vertical presenta dos situaciones importantes. Una cuando la

gota asciende en ese tiempo la fuerza de gravedad es considerada negativa, en ese tiempo las condiciones iniciales en el tiempo cero son: $Y_1'(0) = Y_0$ y $Y_2'(0) = V_{y0}$, en donde Y_0 representa la altura del elevador del aspersor y V_{y0} representa la componente de velocidad vertical a la salida de la boquilla. Dos, cuando la gota desciende, esto sucede cuando la gota alcanza su altura máxima vertical y la velocidad de ascenso es cero, a partir de ese instante tiempo la fuerza de gravedad es considerada positiva, en ese tiempo las condiciones iniciales son $Y_1'(T_{m\acute{a}x}) = Y_{m\acute{a}x}$ y $Y_2'(T_{m\acute{a}x}) = 0$. En donde $T_{m\acute{a}x}$ es el tiempo en que la gota alcanza su altura máxima ($Y_{m\acute{a}x}$) y además solucionando el sistema de ecuaciones 44 y 45 por el método de Runge-Kutta con incrementos de tiempo $h = 0.005$ tenemos:

$$Y_{1(i+1)} = Y_{1i} + (h/6) (K_{11} + 2K_{12} + 2K_{13} + K_{14})$$

$$Y_{2(i+1)} = Y_{2i} + (h/6) (K_{21} + 2K_{22} + 2K_{23} + K_{24})$$

$$K_{11} = f_1(t_i, Y_{2i})$$

$$K_{21} = f_2(t_i, Y_{2i})$$

$$K_{12} = f_1(t_i + h/2, Y_{2i} + K_{21}/2)$$

$$K_{22} = f_2(t_i + h/2, Y_{2i} + K_{21}/2)$$

$$K_{13} = f_1(t_i + h/2, Y_{2i} + K_{22}/2)$$

$$K_{23} = f_2(t_i + h/2, Y_{2i} + K_{22}/2)$$

$$K_{14} = f_1(t_i + h, Y_{2i} + K_{23}/2)$$

$$K_{24} = f_2(t_i + h, Y_{2i} + K_{23}/2)$$

El esquema numérico anterior aplica para las dos situaciones de la componente vertical, siempre y cuando se tome en consideración el signo de la fuerza de

gravedad.

Para la solución de los dos esquemas numéricos generados, se desarrolló un programa de cómputo con el nombre de GOTASP.BAS en Lenguaje QBASIC, el programa se ejecuta con la entrada de los datos de Presión en m.c.a., el ángulo de trayectoria en grados, el coeficiente de descarga, el tiempo de vuelo segundos, el incremento del tiempo de vuelo y los datos de salida son tiempo de vuelo, alcance horizontal, velocidad horizontal, alcance vertical, velocidad vertical, diámetros de gotas,

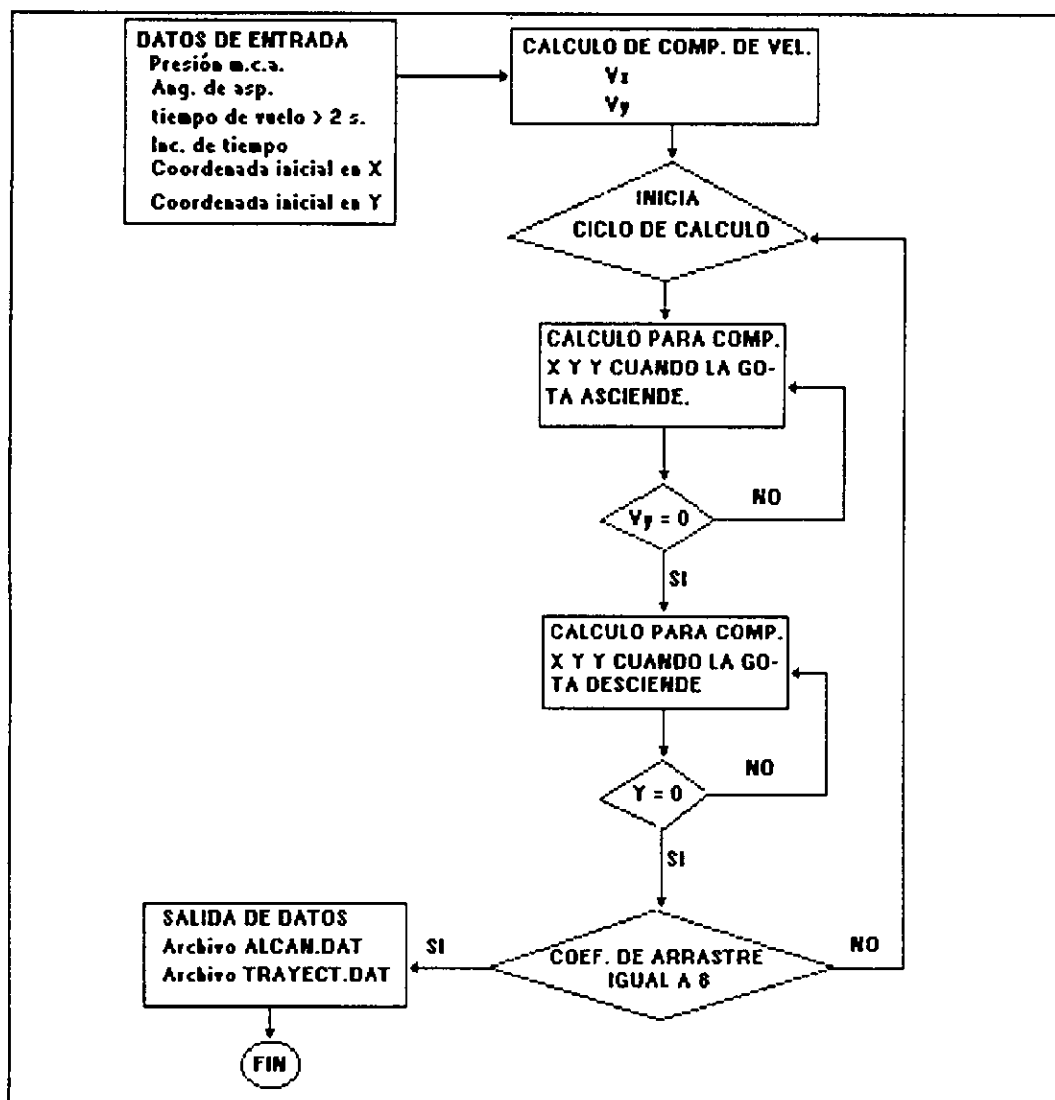


Figura 10. Flujograma del programa GOTASP.BAS.

coef. de arrastres, los cuales se despliegan en pantalla o se generan archivos.dat, para distribución de gotas y trayectorias de una gota en particular, que consecuentemente pueden ser importados a una hoja electrónica para su análisis, se presenta un flujograma del programa, figura 10.

Se consideraron dos condiciones para la generación de distribución de gotas para una misma presión, una donde se corrió el modelo con el 100% de la velocidad de salida de la boquilla y otra donde se consideró el efecto del brazo del aspersor, en lo que varios autores, coinciden en que el efecto equivale a una disminución del 30% de la velocidad a la salida de la boquilla, para aspersores que van de un tamaño pequeño a medio, esto implica tener dos distribuciones de gotas para una misma presión, para lo cual se optó por tomar los valores medios de las distribuciones, para una misma distancia del aspersor.

4.4. COEFICIENTE DE ARRASTRE

Para el trabajo, la formulación usada para la determinación del coeficiente de arrastre fué la de After Hills y Gu (1989) con la formula siguiente:

$$C_2 = 0.4671 D^{-0.9859} \quad (\text{Ec. 47})$$

Donde: C_2 = Coeficiente de arrastre

D = Diámetro de gotas en (mm)

En un trabajo realizado por Ido Seginer y Dov nir, 1991, donde comparo varias formulaciones, la variante anterior, es una de las que tuvo mejor comportamiento con datos reales, además de que involucra el diámetro de gota.

4.5. METODOLOGÍA DE APLICACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE GOTAS

4.5.1. Análisis de las distribución de gotas

Una vez que se obtuvieron datos de distribución de gotas experimentales y del modelo numérico; se hizo una comparación gráfica, de los datos en las posiciones filmadas (2,5 y 7 ó 8 m). Como se observo que en la realidad existe una variación en tamaño de gotas en una misma posición, pero con un comportamiento definido de que a mayor distancia del aspersor el tamaño de gotas tendían hacer de mayor diámetro, por lo cual se tomó el diámetro de gota medio, y se asumió que el diámetro de gota generado por el modelo a esa distancia era un valor medio.

4.5.2. Reducción de la velocidad de infiltración

Para el análisis de la reducción en la velocidad de infiltración por el sellado de la caída de las gotas, se usó la fórmula empírica desarrollada por Von Bernuth (1980), la cual es una función del diámetro de gota, su velocidad y característica del suelo.

$$R = 3.541 D^{0.683} V^{1.271} S_a^{0.353} S_i^{0.237} \quad (\text{Ec. 48})$$

Donde:

R = Reducción de la velocidad de infiltración en %

D = Diámetro de la gota (mm)

V = Velocidad de la gota (m/s)

S_a = Contenido de arena en %

S_i = Contenido de limo en %

para los contenidos de arena y limo se usaron datos de suelos analizados por David D. Bosch (1986), que es un suelo BARNES franco colectado cerca de Morris, Minesota, con las siguientes características: contenido de arena 35.4%, contenido de limo 41.0 %, contenido de arcilla 23.6%, Conductividad Hidráulica Saturada 8.29 cm/h.

4.5.3. Reducción de infiltración y Energía cinética

En la determinación de la energía cinética se usaron las distribuciones generadas por el modelo y los datos de agua precipitada de las pruebas de aspersion, La conversión a energía cinética (K_{el}), en Joules/cm², fue de la siguiente manera

Primero se determina la energía cinética generada por una gota con la fórmula

$$K_e = (5.23598 E^{-7} D^3 V^2) / 2 \quad (\text{Ec. 49})$$

Donde:

K_e = La energía cinética generada por una gota, (Joules)

D = Diámetro de gota, (mm)

V = Velocidad de la gota (m/s)

el segundo paso es el determinar el número de gotas por lámina precipitada por centímetro cuadrado.

$$\text{No. de gotas} = (190.9862 L_a)/(5.23598E^{-7}) D^3 \quad (\text{Ec. 50})$$

Donde:

No. de gotas = Número de gotas por cm^2

L_a = Lámina de agua precipitada, (mm)

D = diámetro de gota, (mm).

Como último paso se determina la energía cinética total

$$K_{et} = K_e \times \text{No de Gotas} \quad (\text{Ec. 51})$$

Consecuentemente se gráfico K_{et} para las diferentes presiones analizadas y se comparo con la reducción en la velocidad de infiltración y distribución de diámetros de gotas.

V. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

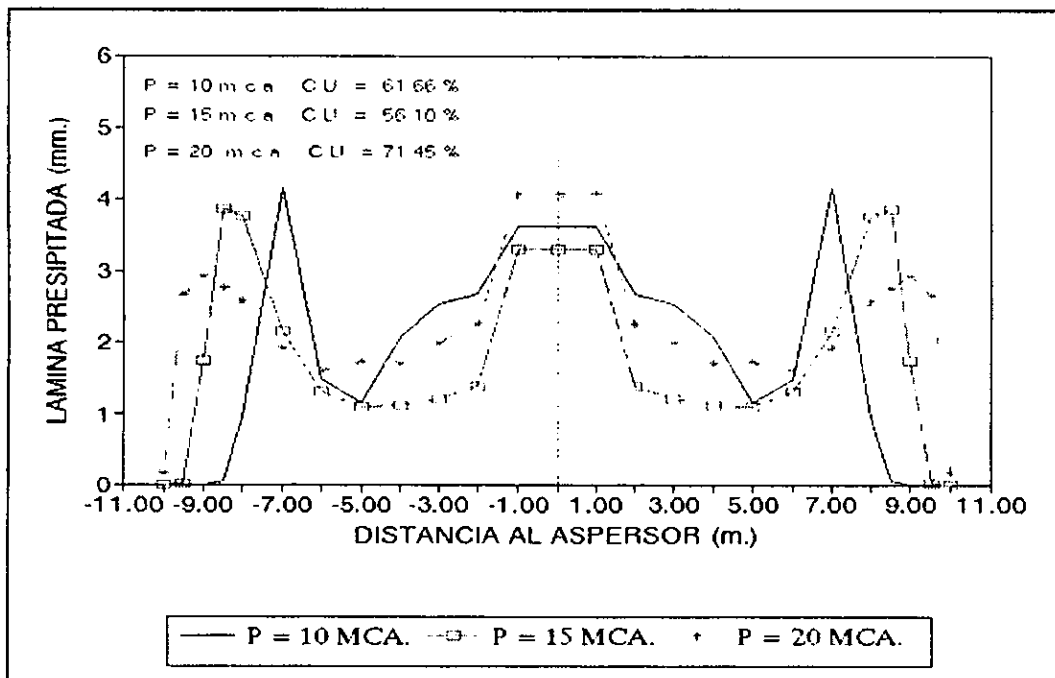
5.1. PRUEBA DE ASPERSIÓN.

Usando el método volumétrico, se hizo el aforo del aspersor para presiones de 10, 15 y 20 m.c.a. Los resultados se presentan en la tabla 4, estos tienen semejanza con la precipitación capturada en las pruebas de aspersión por el método radial, tabla 5 del anexo.

PRESION (m.c.a.)	TIEMPO (Seg.)	VOL. CAPT. (ml.)	GASTO (m ³ /H)	GASTO MED. (m ³ /H)
10.0	9.00	900.00	0.360	0.2852
	9.50	825.00	0.313	
	13.00	915.00	0.253	
	13.00	890.00	0.246	
	13.00	915.00	0.253	
15.0	12.00	1070.00	0.312	0.3516
	8.50	980.00	0.415	
	10.00	1015.00	0.365	
	11.00	1025.00	0.335	
	11.50	1025.00	0.312	
20.00	12.00	1300.00	0.390	0.4210
	10.00	1205.00	0.434	
	11.00	1235.00	0.404	
	9.00	1.210	0.484	
	11.50	1253.00	0.393	

Tabla 4. Resultados del aforo del aspersor de prueba, Naan 322/94.

De la prueba de aspersion se observa en la gráfica 9, el comportamiento de la lámina precipitada con respecto a distancias del aspersor, para diferentes presiones (10, 15 y 20 m.c.a.), también se observa el Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (C.U.) generado por el método radial para cada presión, donde la mayor uniformidad de aspersion del aspersor se presentó a 20 m.c.a., C.U. = 71.45%.



Gráfica 9. Prueba de aspersion sencilla para diferentes presiones , aspersor de impacto con ángulo de trayectoria de 11°.

En las tres presiones básicamente existe una forma de dona, con una tendencia a presentar la forma triangular en la presión a 20 m.c.a. considerada como la óptima, en la que se obtienen los mayores niveles de uniformidad, posiblemente la presión de operación donde el aspersor trabaja con una mayor uniformidad esté por arriba de los 20 m.c.a., sin embargo, la presión anterior es la recomendada como la máxima para que trabaje este modelo de aspersor. Es importante aclarar que la baja uniformidad no se debe a una mala aplicación del método de prueba de aspersion, ya que los

datos del aforo y la prueba son semejantes; lo que posiblemente sucedió, es que el aspersor debió haber trabajado con mayor presión, pero no fue posible dársela con la bomba que se trabajo, ya que la máxima alcanzada fue de alrededor de 25 m.c.a. y se generaba mucho rocío muy cerca del aspersor, que debido al tubo de protección se hubiera perdido y no se contabilizaría para la prueba de aspersion; por otro lado, el fin primordial del estudio que era filmar la distribución de gotas del aspersor no era afectada por esto, por lo que se decidió trabajar con dicho aspersor y bomba.

5.2. RESULTADOS DE LAS FILMACIONES CON CÁMARA DE ALTA VELOCIDAD.

De las tomas filmadas en las diferente posiciones y que fueron digitalizadas por medio del equipo de filmación y analizadas por los programas MAP, con el que se obtuvo la velocidad absoluta de las gotas y que fueron un total de 20 archivos con extensión DFS, Tabla 7 del anexo); y el programa MAW, con el que se calculo el diámetro equivalente, que fueron un total de 20 archivos de imágenes digitalizadas con extensión MAW, tabla 6 del anexo. De diferentes distancias de la trayectoria de aspersion y presiones, figuras 11, 12, 13 y del apéndice de la 14 a la 19, las gotas encerradas en círculos son muestras de imágenes de gotas seleccionadas, tales y como se observan en el monitor de la computadora y que mediante la función de área se trazo el bordo y calculo el área de la misma.

Durante el proceso de la filmación se presentaron situaciones que dificultaron la obtención de las imágenes y los parámetros de medición de interés (área y velocidad); estos son:

1. En cuanto a la iluminación, no se pudo dar el contraste mas adecuado que facilitará

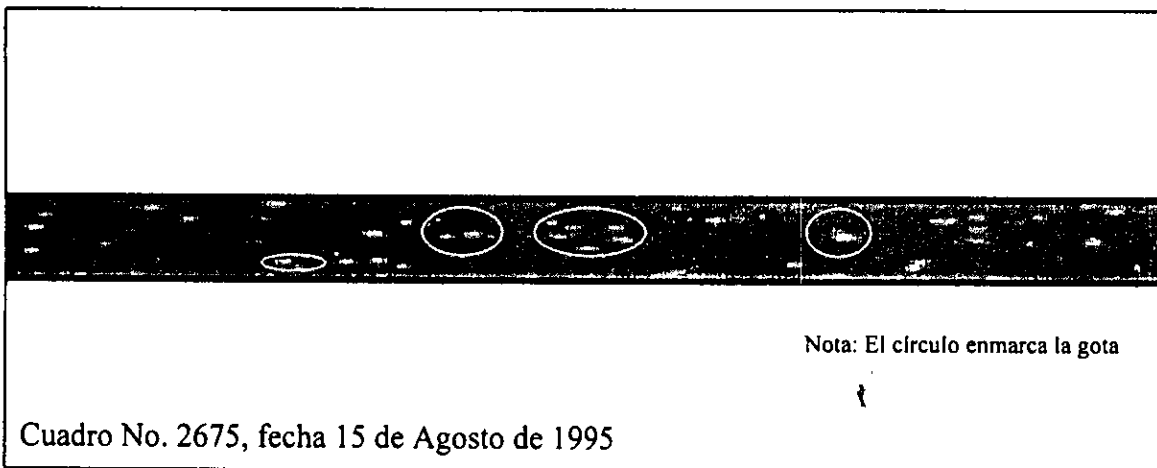


Figura 11. Filmaciones de gotas de archivos digitalizados a una presión de 15 m.c.a. y a 2 m. del origen de aspersión.

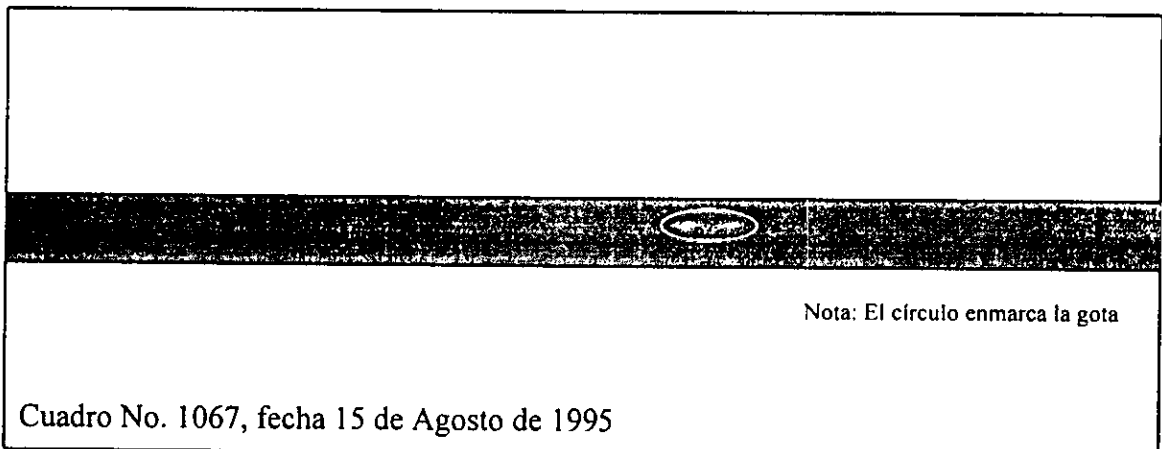


Figura 12. Filmaciones de gotas de archivos digitalizados a una presión de 15 m.c.a. y a 5 m. del origen de aspersión.

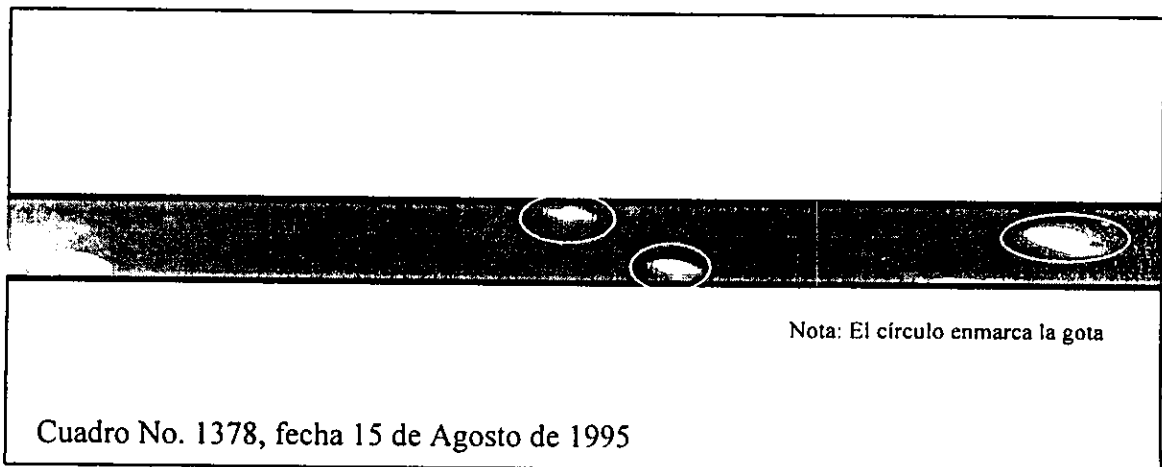


Figura 13. Filmaciones de gotas de archivos digitalizados a una presión de 15 m.c.a. y a 8 m. del origen de aspersión.

y nos diera imágenes más nítidas al momento de filmar, para corregir esta situación, se jugó con las tomas en la pantalla del monitor, de tal forma que se pudiera tener definiciones adecuadas de las gotas, se logró buena definición con un fondo en pantalla de color gris.

2. En cuanto al número y posición de tomas, es importante que para trabajos subsecuentes o donde el aspersor tenga mayor radio de cobertura, usar mayor cantidad de posiciones a lo largo de la trayectoria y un mayor número de tomas en una sola posición.

3. Es importante que el monitor donde se trabajen los archivos digitalizados, tenga mayor resolución (mayor número de píxeles), para tener mejor forma de la imagen de gotas pequeñas.

4. Se encontró que el trazar el borde de las gotas con el puntero usando el mouse, es bastante difícil, para eliminar el error de trazo, la gota se debe arear varias veces (mínimo tres) y así obtener una media.

5.2.1. Metodología desarrollada de filmación de chorros de aspersión en condiciones de laboratorio.

En la metodología que a continuación se propone, se busca que cualquier otra persona que se interese en utilizar un equipo de cámara de alta velocidad para filmar chorros de aspersión, más que una receta, tenga un punto de partida, que le permita ahorrar tiempo y cometer menos errores en la obtención de datos.

Colocación del aspersor.- debido a que los laboratorios generalmente son de espacios reducidos y que al mismo tiempo se trabaja en otros estudios, es necesario que la colocación del aspersor, sea de tal forma que moje la menor área posible y que el agua que se precipite al suelo caiga sobre alcantarillas o rejillas de drenaje. Para lograr esto es necesario colocar el aspersor dentro de un tubo protector como se muestra en la foto 4, éste debe ser del diámetro mas grande posible, para este trabajo se uso un tubo de PVC con diámetro de 10 pulgadas, al cual a la altura de la boquilla del aspersor debe hacerse una ventana por donde salga el chorro de aspersión, en este caso de 14 x 6 cm., y que permita el libre paso del chorro, es importante también colocar al aspersor un manómetro y un bay-pass por medio de los cuales se pueda controlar la presión foto 4 y fig. 6. En la dirección de la salida del chorro por la ventana debe existir en el suelo alcantarillas de tipo rejillas, para que por allí se infiltre el agua precipitada.

Pantalla de filmación.- Esta debe ser colocada paralela a la dirección de salida del chorro y en sentido perpendicular a la cámara, foto 6, lo mas cerca del chorro de aspersión unos 50 a 100 cm., se recomienda una pantalla de color azul cielo, ya que está permitió obtener un contraste adecuado con las gotas al momento de la filmación.

Iluminación.- El objetivo, como se ha mencionado anteriormente, de la iluminación es lograr un contraste de las gotas que permita filmarlas, es necesario que el área donde se filmará permanezca oscuro, las lámparas a usarse deben ser

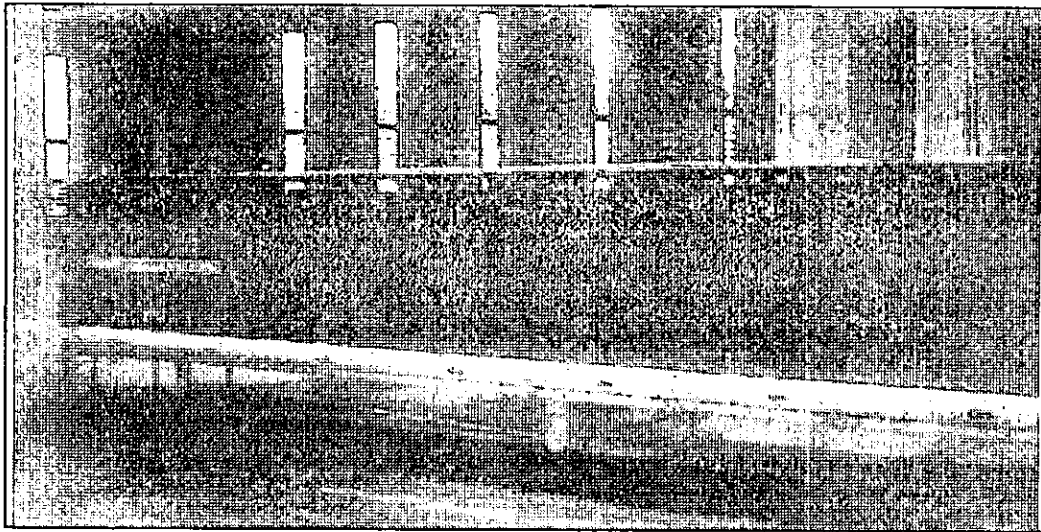


foto 6. Colocación de la pantalla de filmación, tela azul cielo

de alta intensidad de luz, semejantes a las usadas en los estudios fotográficos, deben ser colocadas perpendiculares a la dirección del chorro y enfrente de la cámara de filmación, foto 7, tratando de que no le pegue directamente al foco de la cámara, ya que podría dañar la cámara, más bien la lámparas deben ser dirigidas en forma encontrada hacia el área del chorro que se filmará, fig. 9.

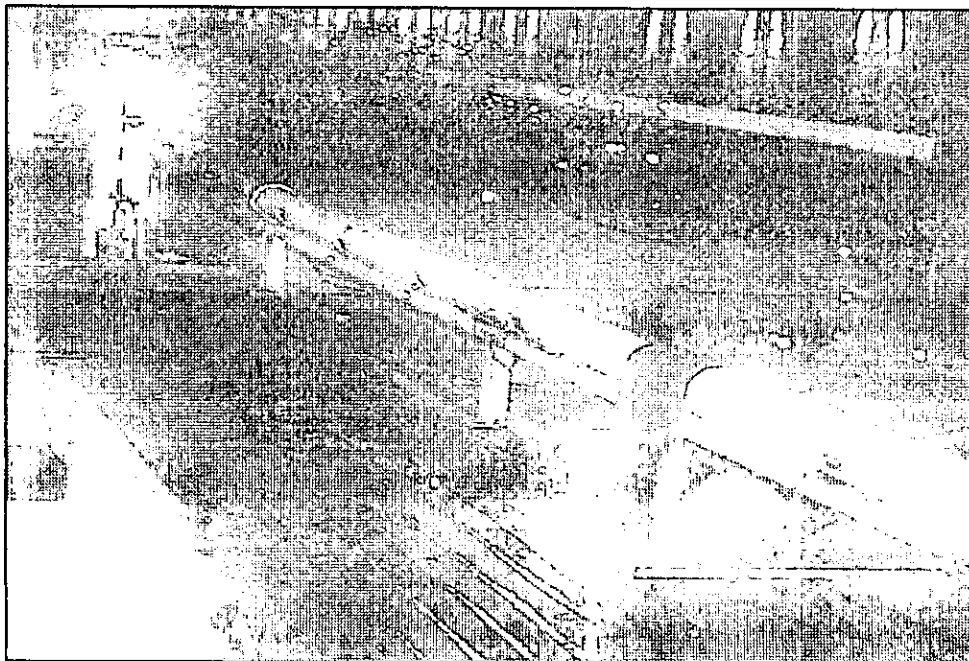


foto 7. Iluminación de la zona de filmación de gotas

Equipo de filmación y computo.- como se ha venido mencionando el equipo de filmación debe ser de alta velocidad, y la cámara deberá ser colocada prácticamente al nivel del suelo, dirigida perpendicularmente a la dirección del chorro a una distancia de entre 75 y 95 cm., foto 8, para mayor seguridad es necesario proteger la cámara con una bolsa de plástico, que evite que le caiga el rocío que se genera del chorro de aspersión. En cuanto a los programas de análisis de los archivos de filmaciones, se recomienda usar aquellos que permitan, en este caso, manipulación de imágenes filmadas con cámara de alta velocidad, como son el MAP Y MAW, estos programas fueron usados para determinar velocidades absolutas y áreas de las imágenes de gotas, pero sin embargo estos tienen muchas funciones, que dependerá del interés del estudio lo que se utilizara.

El monitor del equipo de computo, se recomienda usar como mínimo uno tipo ultra VGA o de superior resolución, que permita mayor definición de imágenes de gotas pequeñas, en lo que respecta al trazador del bordo de las gotas para la determinación del área, el mouse es un aparato no muy adecuado, en caso de usarlo se hace necesario hacer varias medidas de una sola gota (3 o más) y obtener un valor medio.

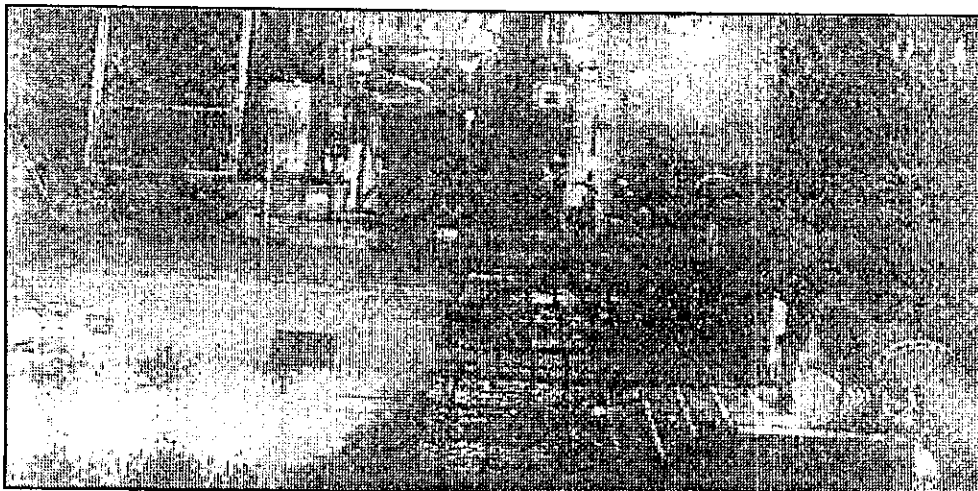


Foto 8. Colocación de cámara para filmación.

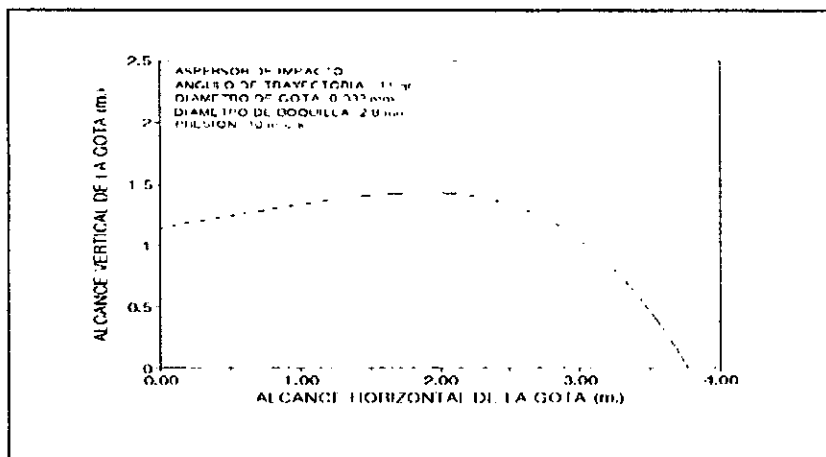
Número de filmaciones. - El número de filmaciones que se hagan dependerá del tamaño del diámetro de aspersión, para el caso concreto se usaron tres posiciones (2, 4 y 7 ó 8 m.) ya que el radio máximo de aspersión fue de aproximadamente 10 m., la altura de filmación con respecto a la superficie del suelo fue de 20 cm.

Como se menciona esto no trata de ser una receta, sino un punto de partida, las modificaciones a la metodología, dependerá del equipo con que se cuente y los parámetros de interés del estudio del chorro de aspersión.

5.3. MODELO BALÍSTICO DE LA TRAYECTORIA DEL CHORRO

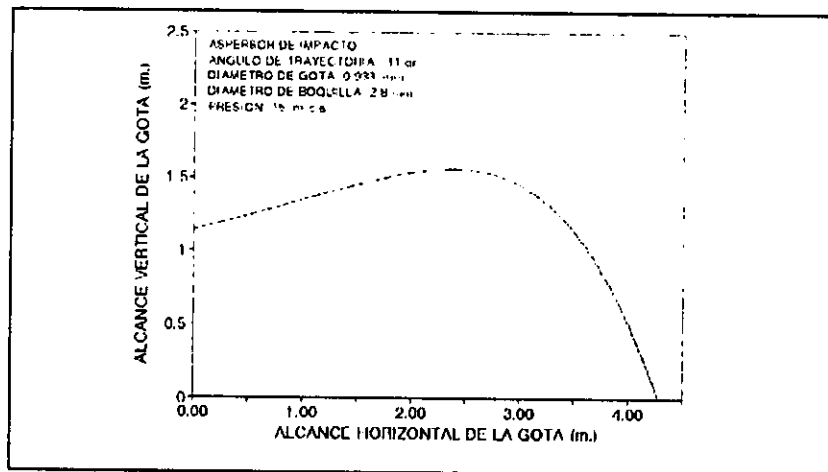
De las corridas del modelo se presentan datos del alcance de distribuciones de gotas y trayectoria de gotas, tabla 8 y 9 del anexo, se graficó como ejemplo la trayectoria de varias gotas.

se muestran las gráficas 10, 11 y 12 de una gota de 0.993 mm. de diámetro para las presiones estudiadas, existiendo un comportamiento tal, que a mayor presión mayor alcance de la gota, es necesario aclarar que para todas las pruebas corridas se

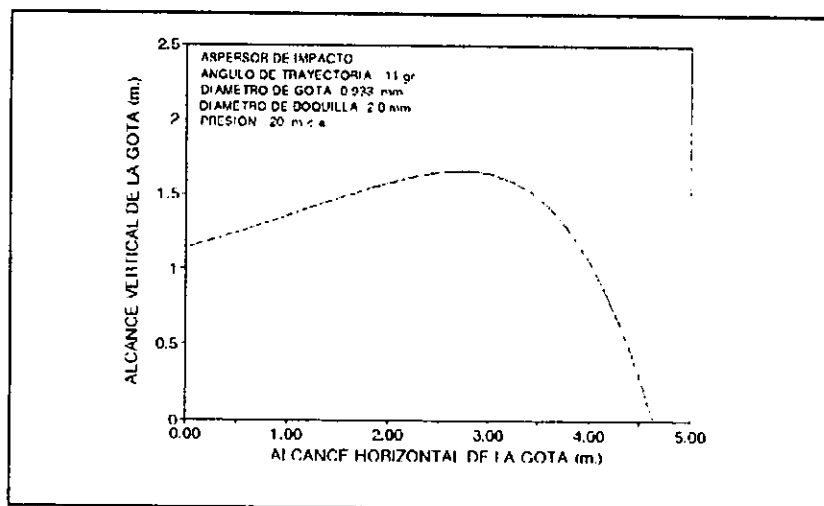


Gráfica 10. Trayectoria de una gota de 0.993 mm., 10 m.c.a.

considero el elevador del aspersor vertical y una superficie plana, en las gráficas se nota el efecto del termino del coeficiente de arrastre, que provoca que la trayectoria



Gráfica 11. Trayectoria de una gota de 0.993 mm., 15 m.c.a.

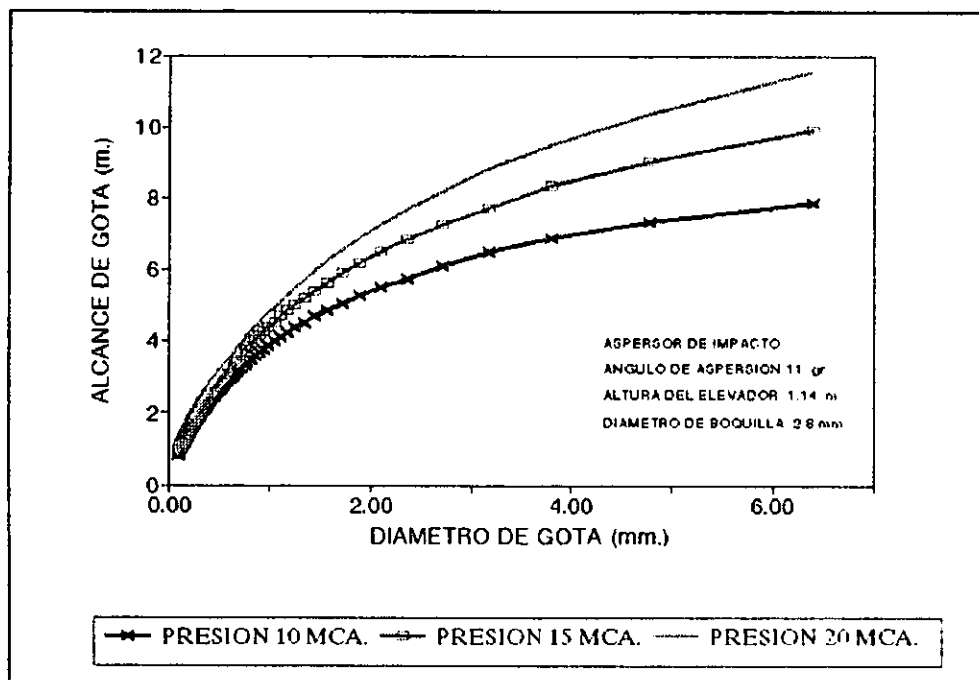


Gráfica 12. Trayectoria de una gota de 0.993 mm., presión 20 m.c.a.

sea parabólica. En la gráfica 13 se comparará el diámetro de la gota con respecto a los alcances de sus trayectorias, confirmándose el hecho de que a mayor presión existe mayor alcance horizontal de la gota para un mismo diámetro. Es importante

mencionar que los diámetros de gotas usados en el modelo son las obtenidas de la curva de After Hills y Gu (1984), que van desde un rango de 0.3 mm. hasta 6.0 mm.

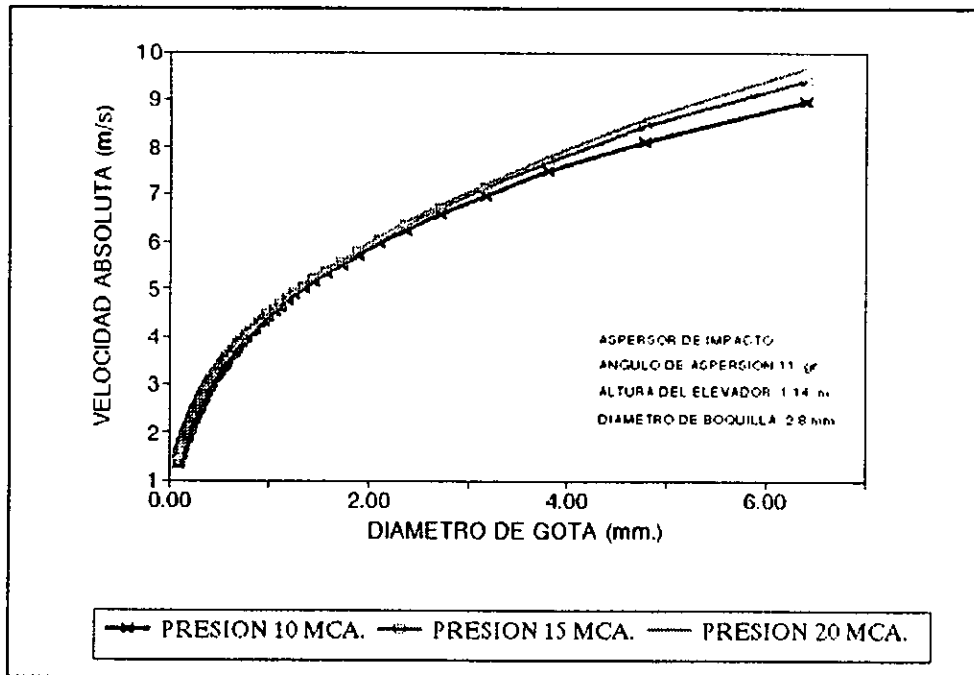
Con respecto a las velocidades absolutas alcanzadas por las gotas un instante antes de tocar la superficie del suelo, conocida está como velocidad de impacto, se presentan las gráficas 14,15 y 16. La velocidad impacto es de suma importancia en el proceso del sellado del suelo, ya que la velocidad con que se impacta la gota es proporcional a la energía transmitida al suelo y hace que la estructura del suelo se disgregue.



Gráfica 13. Alcances de diámetros de gotas con diferentes presiones.

En la gráfica 14 se puede concluir que independientemente de la presión, una vez que la gota alcanza su altura vertical máxima y empieza su descenso, no existe gran diferencia para diámetros diferentes de gotas de la velocidad de impacto

alcanzada, tomando en cuenta la ecuación de energía cinética, $E_c = mV^2$, se puede pensar que la energía transmitida a la superficie para dos masas que se impactan prácticamente a la misma velocidad, depende de sus diferencias de masas.

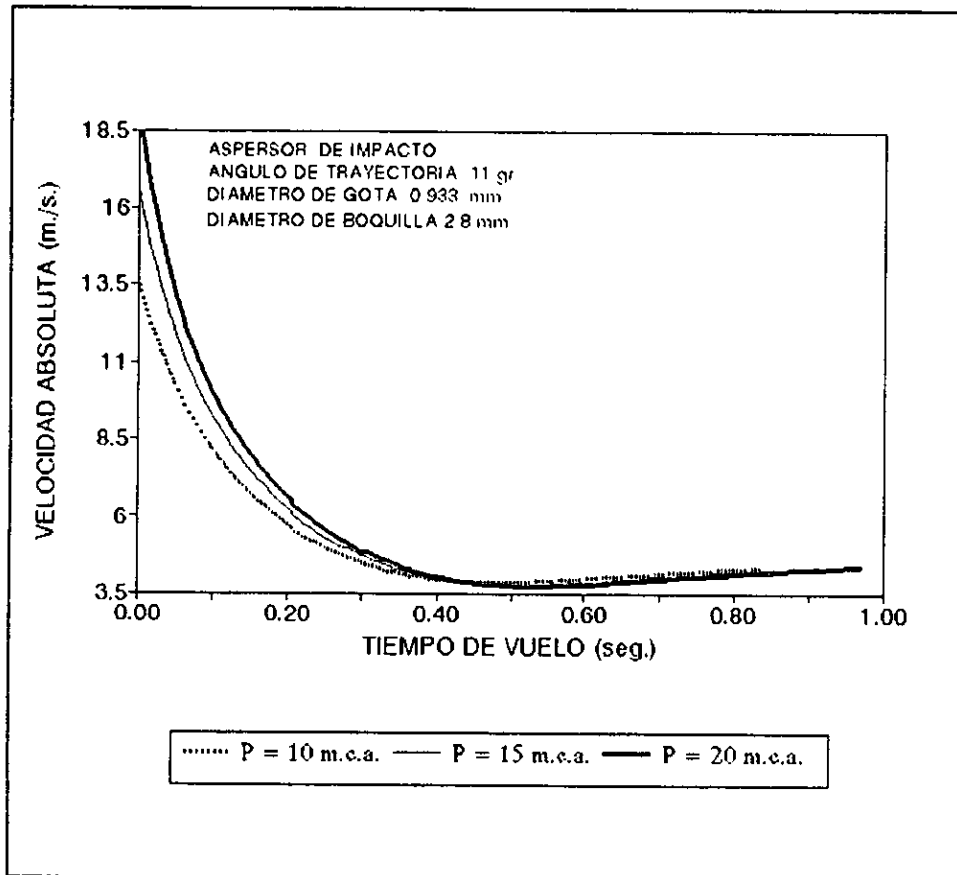


Gráfica 14. Velocidad de impacto de gotas para diferentes presiones.

Las gotas de un mismo diámetro alcanzan prácticamente la misma velocidad de impacto para diferentes presiones, debido a que la velocidad en la componente vertical cuando la gota asciende en su trayectoria llega a ser cero, que es también cuando alcanza la altura máxima, por lo tanto cuando la gota empieza su descenso, la condición inicial de velocidad es cero en la componente vertical y su condición final es la velocidad de impacto que se puede considerar igual para diferentes presiones.

En la gráfica 15, se compara la velocidad de una gota de 0.993 mm. de diámetro en el tiempo para diferentes presiones en su trayectoria, podemos ver que

para las tres presiones tiende a llegar a una velocidad constante, por algunos investigadores conocida como velocidad terminal de la gota y nos muestra que

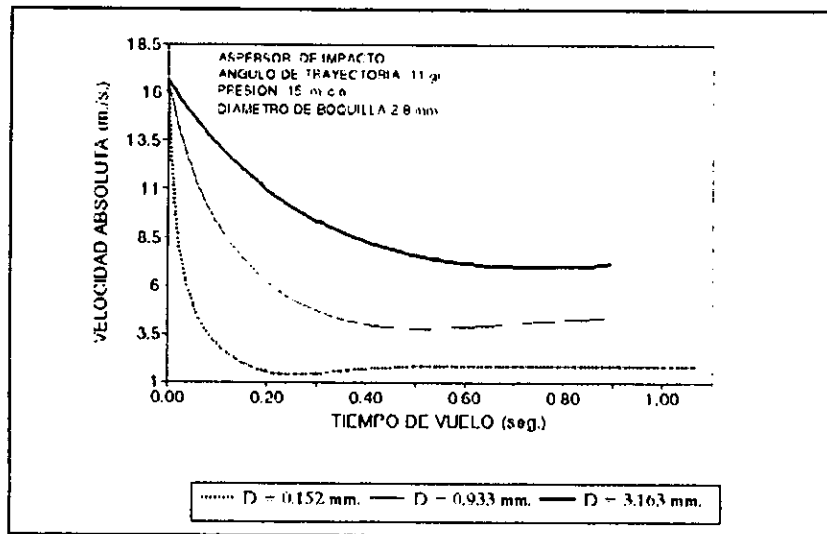


Gráfica 15. Velocidad absoluta en el tiempo de una gota a diferentes presiones.

independientemente de la presión que genere dicho tamaño de gota para tiempos relativamente largos alcanzara su velocidad terminal, se considera que esta velocidad es alcanzada en aspersores grandes o cañones de aspersion, que trabajan a mas de 40 m.c.a.

La gráfica 16, muestra el comportamiento de la velocidad absoluta en el tiempo

para diferentes diámetros de gotas, en los tres tamaños gráficos se observa como alcanzan su velocidad terminal y que mayor tamaño de gota mayor velocidad terminal.

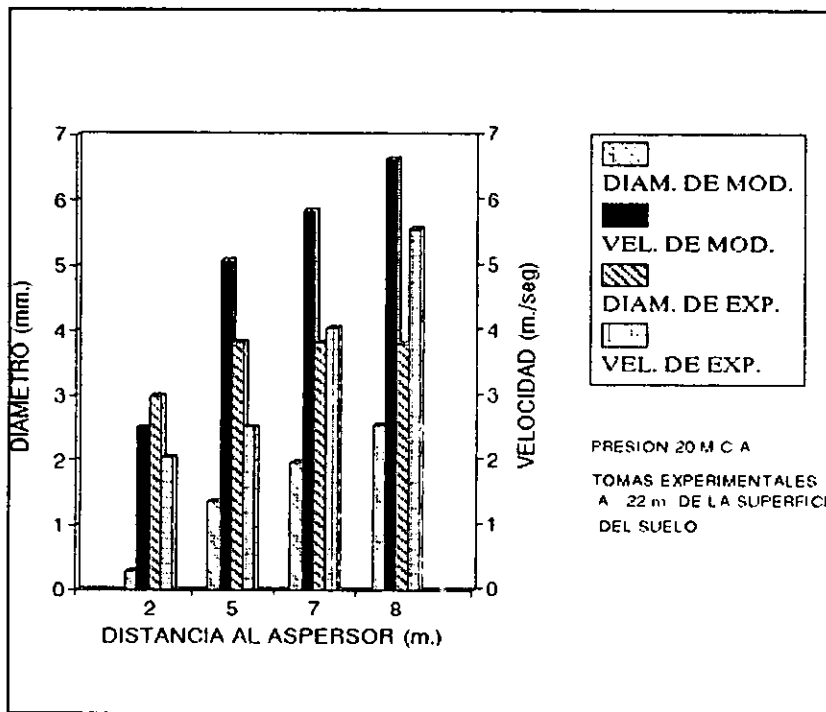


Gráfica 16. Velocidad absoluta de gotas en el tiempo, para diferentes diámetros de gotas.

5.4. COMPARACIÓN DE DATOS DE GOTAS DEL MODELO Y EXPERIMENTALES.

Con los valores medios obtenidos para cada posición y presión de la velocidad y diámetro de las gotas filmadas, se graficó con datos del modelo en las mismas posiciones y para las mismas presiones, gráfica 17, Donde se observa, que para tamaños de gotas muy pequeñas, como son las que se presentan a una distancia de 2 metros del aspersor, existen diferencias fuertes en cuanto al diámetro de gota media obtenida por los datos experimentales, con respecto a los generadas por el modelo que son consideradas como valores medios, en relación a la velocidad no existen diferencias fuertes en cuanto a su determinación experimental, posiblemente la

diferencia tenga que ver más con el coeficiente de arrastre del modelo, en cuanto al diámetro parece que tal diferencia se debe a la dificultad para determinarlo en las gotas pequeñas obtenidas experimentalmente; conforme la gota de tamaño medio se aleja del aspersor hasta los 8 metros, que es donde se presenta el tamaño medio de



Gráfica 17. Comparación de datos del modelo con datos experimentales, de diámetros y velocidades de gotas

los datos tanto experimentales como los generados por el modelo se asemejan más; ya que en tamaños grandes la determinación del diámetro es más fácil.

En la gráfica 18, se trazaron los cocientes de los tamaños medios del modelo entre los del experimento, para el diámetro y velocidad, para las distancias o

posiciones de estudio, estos cocientes nos dan una razón de cuánto realmente el modelo explica lo real, datos experimentales. Se puede ver que es coincidente con el hecho de que a mayor distancia del aspersor se tiene un mayor grado de representación real del modelo, (Para diámetro el cociente es arriba del 60% y la velocidad cerca del 90%), volviendo a caer en el hecho de que a esas distancias las gotas son más grandes y se define mejor su diámetro y la velocidad en gotas pequeñas es mayormente afectada por el coeficiente de arrastre del modelo debido al tamaño de su masa.

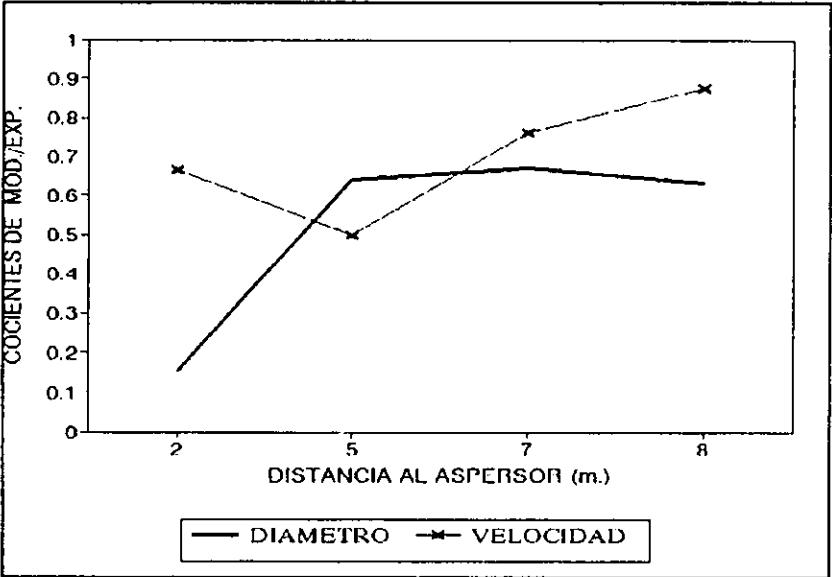


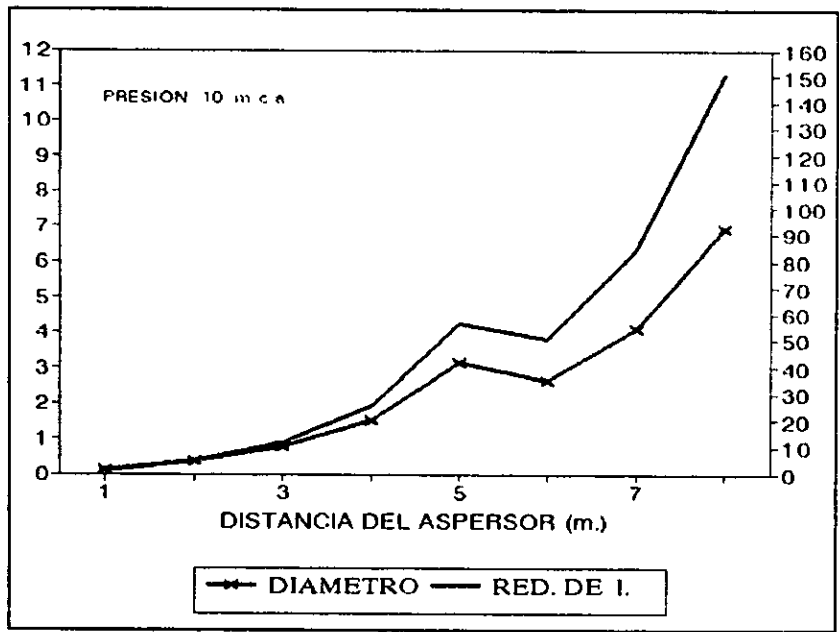
Gráfico 18. Cocientes de datos medios del modelo entre experimental.

Está situación de las dos gráficas anteriores, de que en tamaños pequeños de diámetros de gotas medios exista poca relación con lo real, se deba quizás, a la falta de elementos o herramientas que permitan, a los datos filmados poder tener mayor definición en el tamaño, por que si se da uno cuenta, la velocidad para tamaños

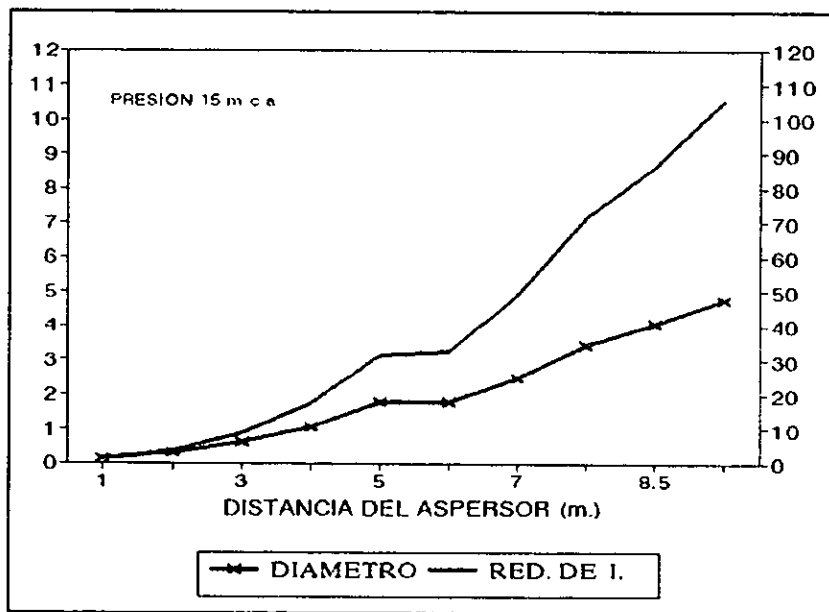
pequeños es parecida a la del modelo como la del experimento, y en la gráfica 18 incluso podemos ver que para velocidades medias a 2 metros de distancias el cociente esta cerca del 70%., sin embargo en forma general es importante también esclarecer que es necesario, todavía, buscar mejores coeficientes de la fuerza de arrastre que permiten simular mejor los datos del modelo.

5.5. REDUCCIÓN DE LA INFILTRACIÓN POR LA VELOCIDAD DE IMPACTO DE LAS GOTAS.

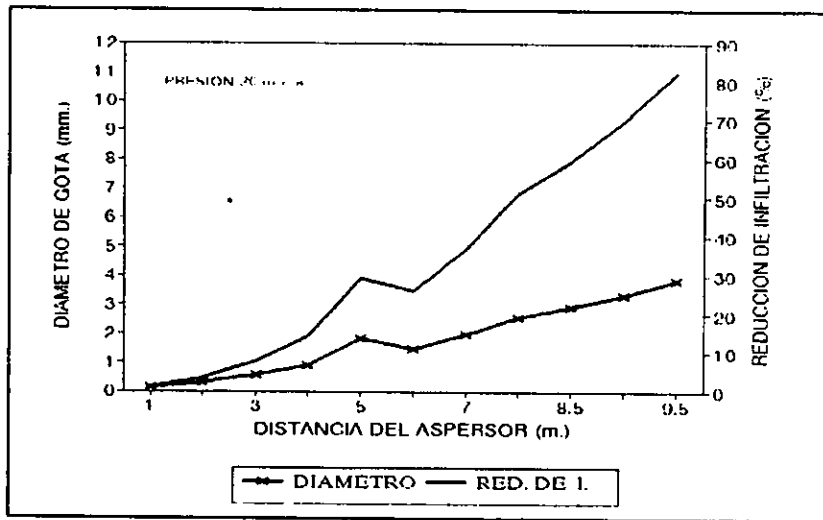
Con el uso de las distribuciones de gotas y velocidad de impacto obtenidas a través del modelo, y usando la formula empirica de Von Bernuth para determinar la reducción en la velocidad de infiltración en un suelo tipo BARNES, tabla 11 del anexo, se obtuvieron las gráficas 19, 20 y 21; donde se observa que a medida que aumenta la presión con un consecuente mejoramiento en el tamaño de gotas, disminuye el efecto reductivo de la velocidad de infiltración. En este caso se observa que a una presión de 10 m.c.a. las reducciones de la velocidad de infiltración es muy alta, según la formula, arriba incluso del 100%, situación que no puede ser posible, sin embargo hay que recordar que la formula de reducción es empírica y tiene límites de aplicación. Para una presión de 20 m.c.a. se obtienen los niveles más bajos de reducción de infiltración.



Gráfica 19. Reducción de infiltración, para P = 10 m.c.a., suelo BARNES.



Gráfica 20. Reducción de la infiltración para P = 15 m.c.a., suelo BARNES.



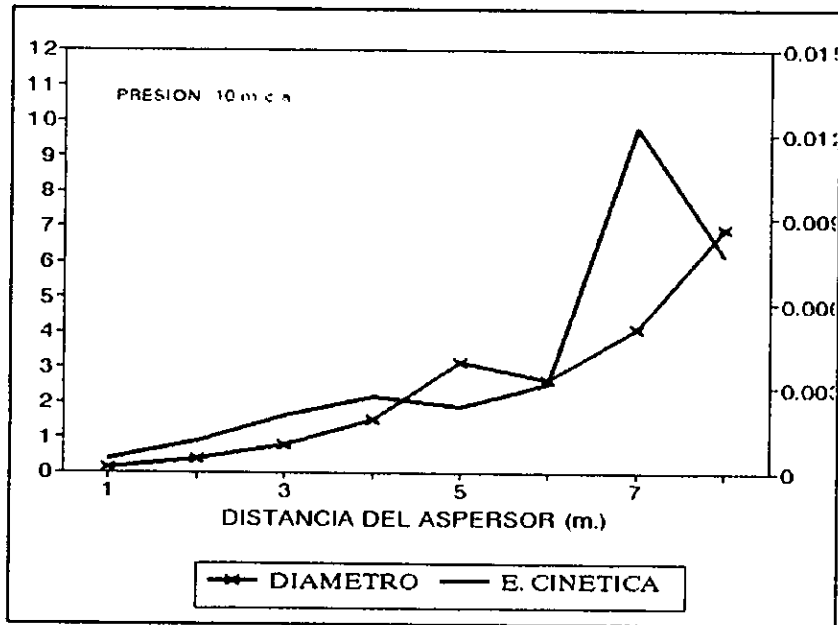
Gráfica 21. Reducción de la infiltración para 20 m.c.a., suelo BARNES.

Es claro que en la medida que se obtengan aspersores con distribuciones de gotas adecuadas, evitaremos reducción en la velocidad de infiltración, por el sellado del suelo al impacto de gotas de tamaño grande.

5.5.1. Análisis de la producción de energía cinética.

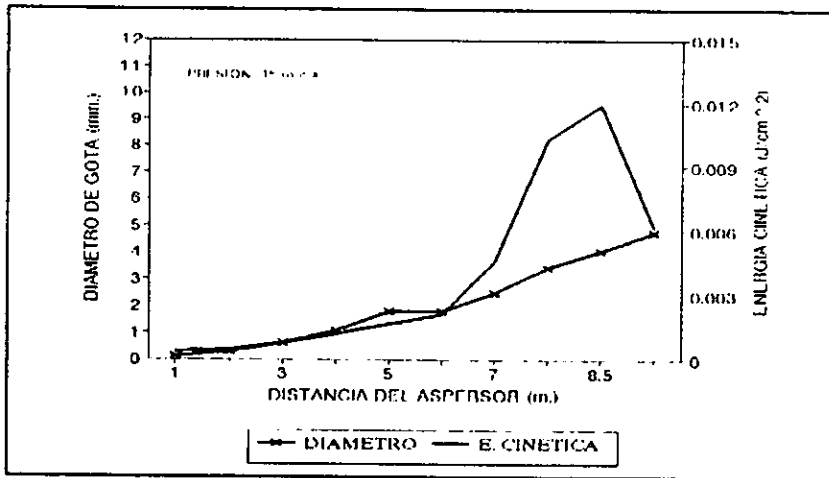
En el análisis de la energía cinética producida por las gotas precipitadas, y que fueron obtenidas como función de la lámina precipitada y las distribuciones de gotas para las diferentes presiones, existe una mayor producción de Energía cinética para una distancia de 7 m y presión de 10 m.c.a., que tiene una relación con el tamaño de gotas que son mayores en ese punto, que también se relaciona con la reducción en la velocidad de infiltración, gráfica 22, 23 y 24, En la gráfica 24 se puede observar que la producción de energía con respecto a la 22 en la distancia aproximada a 7 m. es

muy baja, que corresponde también a la presión donde se obtuvo la menor reducción en la velocidad de infiltración y que es el de mayor coeficiente de uniformidad (71.45%). Hay que aclarar que el aumento siempre de la presión no es la solución

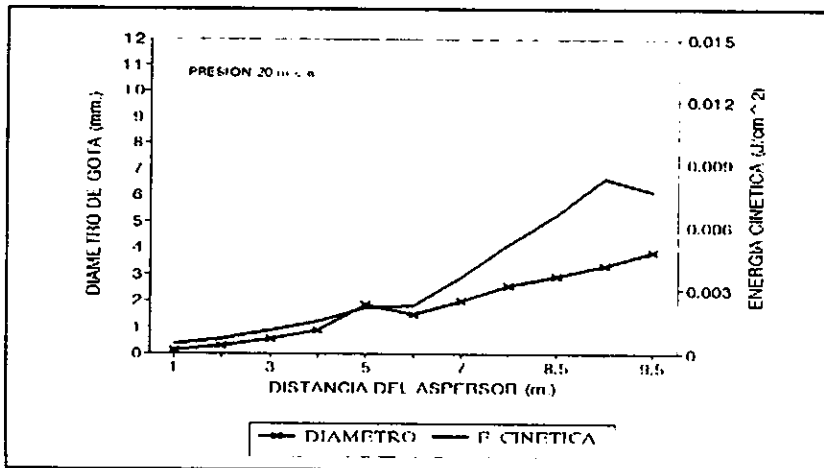


Gráfica 22. Producción de Energía cinética por lámina precipitada, P = 10 m.c.a..

en si, es necesaria la combinación de la presión con otros factores de operación del aspersor para una producción adecuada de distribución de gotas, ya que si aumentamos mucho la presión podemos provocar una atomización del tamaño de las gotas, exponiéndolas a una mayor evaporación y que sean arrastradas por el viento fuera del área de donde deberían caer originalmente.



Gráfica 23. producción de Energía cinética, presión 15 m.c.a.



Gráfica 24. producción de Energía cinética para presión 20 m.c.a.

VI. CONCLUSIONES.

Podemos concluir en forma general, que es posible poder estudiar de forma sistematizada ya sea experimentalmente o teóricamente a través del desarrollo de modelos, la forma en que se distribuyen las gotas y la forma en que afectan la eficiencia en el uso del agua de la aplicación de un aspersor agrícola, sin embargo, es importante hacer mención la necesidad de generar metodologías que permitan un mejor conocimiento del fenómeno, para poder incidir en el mismo. En cuanto a los objetivos del presente trabajo, fue posible llegar a lo siguiente:

a). De las pruebas de aspersión, se aplicó adecuadamente la metodología recomendada por la ISO 7749-2 (1990), y para los rangos de presiones estudiados podemos decir que la presión con el mas alto coeficiente de uniformidad de Christiansen fue a 20 m.c.a. con un C.U. de 71.45%, posiblemente en presiones más altas se habrían obtenido C.U. más altos. Fue posible también desarrollar un esquema numérico, que se programo en lenguaje computacional, que permite calcular el C.U. para el método radial de pruebas de aspersión.

b). Del estudio experimental, de la filmación de las distribuciones de gotas, fué posible obtener filmaciones de las distribuciones de gotas, y podemos mencionar que se pudo desarrollar en cierta forma una metodología para las filmaciones del fenómeno físico, que si bien no es la mejor metodología, permitió obtener filmaciones adecuadas de las distribuciones de gotas, que al mismo tiempo permitió saber cuales son los alcances que puede tener el equipo de filmación con ciertas adecuaciones al mismo.

c). En cuanto al modelo balístico de la de la distribución de gotas, se pudo desarrollar

el esquema numérico y programarlo en lenguaje de computadora, que permitió obtener distribuciones de gotas de chorros de aspersión bajo condiciones de laboratorio (no viento), es necesario sin embargo trabajar en forma paralela con el estudio experimental, que permita adecuar las fuerzas que intervienen en el movimiento de las gotas, de una manera más real, y que de esta forma acerque al modelo teórico a situaciones más reales del fenómeno físico.

d). Del estudio de aplicación, de las distribuciones de gotas del modelo numérico desarrollado, que fue en la reducción de la velocidad de infiltración, se pudo observar mediante la ecuación empírica de la reducción de la velocidad de infiltración, la importancia de obtener distribuciones adecuadas del tamaño de gotas generadas por un aspersor, para evitar el excesivo sellado del suelo por el impacto de las gotas de aspersión. Para los casos de presiones estudiadas y el modelo de aspersor probado, se observa según la gráfica 21, que la presión que menos afectó la reducción de la velocidad de infiltración fue a 20 m.c.a., que coincide también con el C.U. más alto obtenido (71.45%). Es importante también la necesidad de desarrollar modelos analíticos de la reducción de la velocidad de infiltración que permitan un rango mayor de aplicación.

e). En cuanto a la producción de energía cinética, por lámina precipitada transformada en número de gotas, podemos decir que existe una relación entre tamaño de gotas y energía cinética producida por la misma, que a su vez se relaciona con la reducción de la velocidad de infiltración, de tal forma que a mayor tamaño de gotas se produce más cantidad de energía cinética, generando también mayor reducción en la velocidad de infiltración.

VII. RECOMENDACIONES.

a). Es necesario, seguir el estudio de las distribuciones de gotas de un chorro de aspersor, no solamente en aspersores de impacto tipo rehiletes, sino también en aspersores de placa usados en sistemas de riego como los pivotes centrales o de los sistemas de movimiento lateral, para tener un mejor uso eficiente del agua de riego. La alternativa de estudio a través de filmaciones con cámaras de alta velocidad, sea quizás una las mejores opciones para estos tipos de fenómenos físicos, donde al ojo humano no le es posible vislumbrar los diferentes sucesos que se desarrollan en un chorro de aspersión, es necesario sin embargo afinar la metodología de filmación, como es el tener mejor iluminación de las filmaciones, así como un equipo de análisis de imágenes filmadas de mayor resolución, refiriendome más que nada el tipo de monitor, que tenga una mayor densidad de pixeles, que permita trazar de manera más adecuada la forma y el tamaño de las gotas filmadas; es importante también probar otros tipos de lentes de la cámara de filmación.

b). En cuanto al Modelo Balístico de las distribuciones de gotas, es necesario profundizar en la determinación más adecuada de la fuerzas que intervienen en el movimiento de las gotas, que permita un acercamiento más estrecho al fenómeno real, hay que tomar en consideración para la aplicación del modelo balístico, que las distribuciones que genera, se asumen como valores medios de tamaños y velocidades de gotas, cuando en la realidad existe para un mismo punto, una variación de tamaños de gotas. es necesario también incluir en el movimiento de las gotas el efecto del viento y su ángulo de incidencia en el movimiento de las mismas.

c). Para el análisis del sellado de la capa superficial por el impacto de las gotas es

necesario generar estudios específicos para este fenómeno, que nos permita desarrollar nuestros propios modelos para la reducción de la velocidad de infiltración.

VII. BIBLIOGRAFIA

1. Aksel L. Lydersen.(1979).Fluid Flow and Heat transfer.John Wiley sons Ltd.E. U.
357.cap. 6.
2. Claude H. P.(1983).Irrigation.Irrigation Association.E. U. p.-686
3. Concurrent procesing, Inc.(1992).Program and user's guide, MAP. Detroit, EU.
4. Cuenca R. H.(1989).Irrigation system design.printice-hall Inc.E.U. p.-552.
5. Dennis G. Zill.(1988). Ecuaciones Diferenciales. Grup. Edit. Iberoamérica. 2ª
Edición. Colombia. P -516.
6. David D. Bosch and Charles A. Onstad.(1986).The efects of rainfall on surface
soil hidraulic cinductivity. ASAE,St. Joseph.Paper No.86-
2011.p.-15.
7. Derrel L Martin and Richard D H. and George M.(1993).The breakup of jets from
sprinkler Irrigation devices. ASAE.E. U.paper No. 93-
2054.p.-15.
9. Grant R. Fowles.(1962).Mechanics Analitical. Holt-Rinehart-winston.E. U.p.-278.
10. herman D. F., Kohl R. A.(1983).Fluid Dynamics of sprinkler systems.P-583
11. Hills D. J. and Gu Y.(1989).Sprinkler volume mean droplet diameter as a
function of pressure.Transection of ASAE.E.U.32(2).P.-471

12. Ido Seginer, Dov Nir and Von Bernuth R. D.(1991).Simulation of wind-distorted sprinklers patterns.ASCE.Journal of Irrigation and Drainage Engineering.Vol. 117. No. 2 P.-285-306.
13. Iso 7749-2.(1990).International standard Part 2. Uniformity of distribution and test methods.Documento de la ISO.
14. Jensen M. E.(1983). Fluid dynamics of sprinklers systems
15. Ken Solomon.(1979). Variability of sprinkler coefficient of Uniformity test results.Transections of The ASAE. E.U.paper No. 78-2010 .P.-1078-1080.
16. Luis Joyanes Aguilar.(1992).Programación en Quick Basic 4.0/4.5. Mc Graw-Hill.México.p.-608.
17. Martinez Austria P, Fuentes Mariles O. A.(1988).Introducción a los métodos numéricos aplicados a la hidráulica. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.p.- 192.
18. Peter V- O'Neil. (1994). Matemáticas avanzadas para ingeniería. Vol. 2. CECSA. 3ª Edición. México. p- 664.
19. Richard D. H., Derrel L. Martin and George Meyer.(1992). In-flight behavior ofsprinkler drops By digital image analysis.ASAE.E.U.paper No. 92-2526.P.-17.
20. Richard L. B. Douglas J. F.(1985). Análisis Numérico. Iberoamerica.México.P.-721.

21. Robert A. Kohl, Darrell W. De Boer.(1985).Kinetic energy of Low Pressure spray sprinklers.Transections de la ASAE.E.U.Vol. 28(5).P.-1526-1529.
22. Soares A. A, Willardson L. S. and Keller J.(1991).Surface-slope effects on splinker uniformity.ASCE.Journal of Irrigation and drainage engineering.E.U.Vol 117 No. 6.P.- 870-880.
23. Synge J. L. y Byron A. G.(1965).Principios de mecánica.MC Graw- Hill.España.p.- 545.
24. Thooyamani and D. I. Norum. (1987). Equations describing sprinkler droplet velocity.Journal of Irrigation and Drainage Engineering.ASCE.Vol.115.No. 2.paper No. 23339.p-156.
25. Von Bernuth R. D.(1988).Effect of trajectory angle on performance of sprinkler In wind. ASCE. Journal Of Irrigation and Drainage Engineering. E. U. Vol. 114, N.4. P: 579-587.
26. Von Bernuth and J. D. Gilley.(1984).Sprinkler drop size distribution estimation from single leg test data. Transections of ASAE.E.U.April. p- 1435-1441
27. Vories E. D. , Von Bernuth R. D.(1986). Zingle nozzle sprinkler performance in wind. ASAE. Soil and Water.E.U.Vol. 29(5).
28. Wen-Jaur Chang and David J. Hills.(1992). Sprinkler droplet effects in infiltration, I: Impact simulation. Journal of irrigation and Drainage Engineering. ASCE. Vol. 119.No. 1.p-142.

29. White H. E.(1985).Física moderna, Vol I. UTHEA. México. p- 1269.

IX. APENDICE:

Instructivos de los programas GOTASP y RADIAL

INSTRUCTIVO DE LOS PROGRAMAS GOTASP Y RADIAL

Los programas fueron codificados en lenguaje Qbasic, pueden ser ejecutados en computadoras personales con procesadores 286 en adelante, no necesitan coprocesador matemático.

Programa GOTASP

Este programa fue codificado para modelar la trayectoria de gotas que se generan en el rompimiento de un chorro de aspersor agrícola, basados en las ecuaciones de la Teoría Balística mencionadas en el capítulo II y en base al esquema numérico desarrollado por el método de Runge-Kutta de cuarto orden explicado en el capítulo 3.

Funcionamiento

El programa se ejecuta al escribir su nombre dependiendo del drive donde este residente, por ejemplo si esta en **C** sería:

C:\GOTASP <ENTER>

Aparecerá un cuadro de presentación (Fig. 20) que al final indica que para continuar hay que oprimir la tecla **<ENTER>**. Luego se presentara un mensaje (Fig. 21) donde explica que se generaran 2 tipos de archivos, un archivo que guarda los datos de la trayectoria de gotas generadas por el modelo y otro archivo que guarda las características de la gota y su movimiento al momento de caer en el suelo, estos pueden ser leídos en un

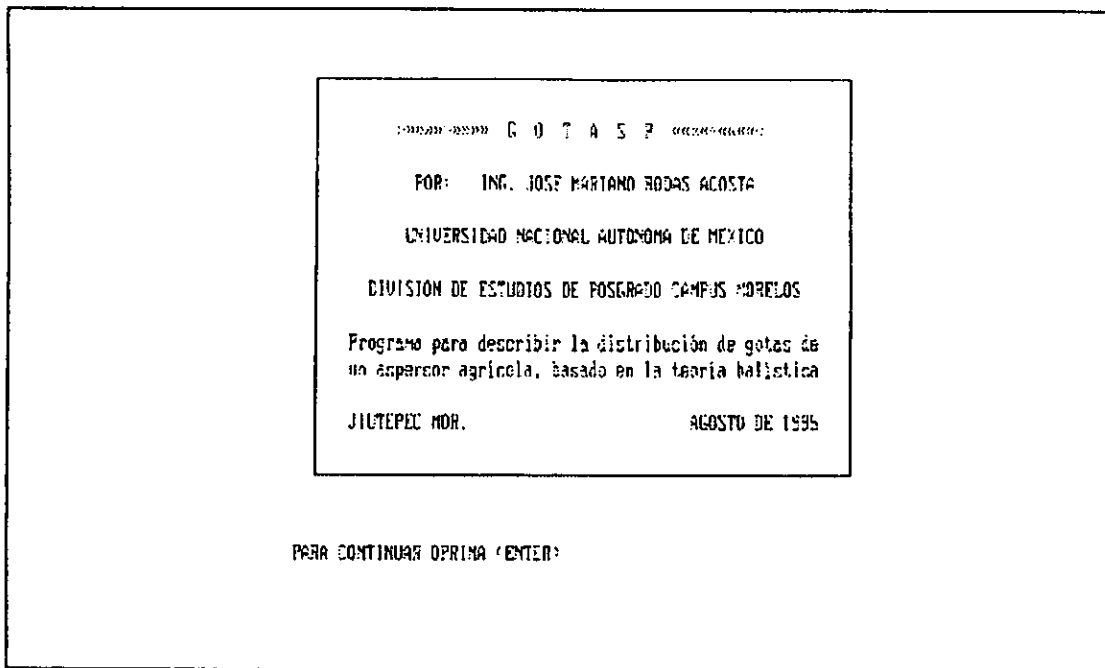


Figura 20. Pantalla de presentación del programa Gotasp

EDITOR e importados a hojas de calculo electrónico para su manejo. Seguidamente del mensaje pedirá los nombres de los archivos con formato **<Nombre.dat>**.

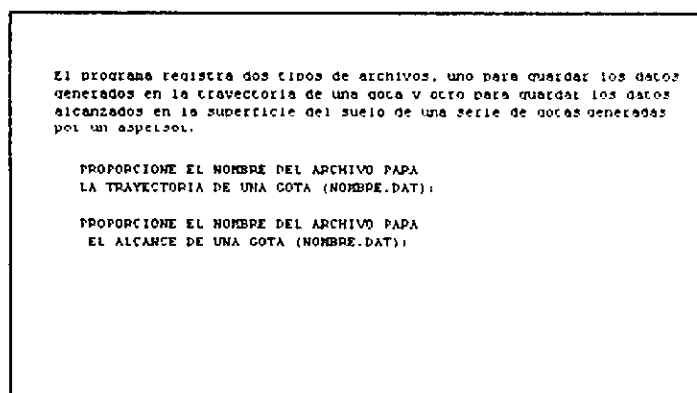


Figura 21. Entrada de nombres de archivos

Procederá a pedir los datos de entrada para hacer una corrida del modelo (Fig. 21), estos datos son: incrementos de tiempo para calculo numérico (T), Tiempo de

calculo de vuelo de la gota (T), ángulo de trayectoria de las gotas (TETA), presión a la salida de la boquilla (P), coeficiente de descarga (CD), coordenada inicial de trayectoria en el sentido horizontal (XL), coordenada inicial de trayectoria vertical (YL), coeficiente de arrastre inicial (CINI) que corresponde al rango mas grande de gotas que se pueden generar de acuerdo a la curva de R. D. Von Bernuth y J. R. Gilley (1984) y el coeficiente de arrastre final (CTER) que corresponde al rango de gotas mas pequeñas que se pueden generar según la misma curva antes mencionada. Seguido de la entrada de datos el programa pregunta se hará corrección de algún dato en caso contrario se teclea la letra **S** y se da <ENTER>.

```
ENTRADA DE DATOS PARA CALCULO DE TRAYECTORIAS DE GOTAS
INCREMENTOS DE TIEMPO PARA CALCULO NUMERICO (<= 0.005 (SEG.): .005
TIEMPO DE CALCULO DE VUELO > DE 2 SEG. (SEG.): 2
ANGULO DE TRAYECTORIA (EN GRADOS): 11
PRESION A LA SALIDA DE LA BOQUILLA (MCA.): 20
COEFICIENTE DE DESCARGA (ADIMENSIONAL): .62
COORDENADA INICIAL DE TRAYECTORIA HORIZONTAL (M.): 0
COORDENADA INICIAL DE TRAYECTORIA VERTICAL (M.): 1
COEFICIENTE DE ARRASTRE INICIAL (>=0.05): .5
COEFICIENTE DE ARRASTRE FINAL (<= 5.45): 1

DESEA CAMBIAR ALGUN DATO S/N:
```

Figura 22. Entrada de datos para cálculos

Seguido realizará el calculo de las variables de modelación: Tiempo (TIE), Coeficiente de arrastre (C), Diámetro de gota (D), Distancia horizontal (X), Velocidad en la componente horizontal (Vx), Distancia vertical (Y) y la Velocidad en la componente vertical (Vy). Datos que son presentados en pantalla y guardados en los archivos que genera el programa (Fig. 23).

TIE	C	D	X	UX	Y	UY
0.700	1.00	0.46	2.24488	1.27723	0.32077	2.86240
0.705	1.00	0.46	2.25125	1.26912	0.30644	2.87037
0.710	1.00	0.46	2.25757	1.26112	0.29207	2.87811
0.715	1.00	0.46	2.26386	1.25322	0.27766	2.88564
0.720	1.00	0.46	2.27011	1.24541	0.26322	2.89295
0.725	1.00	0.46	2.27631	1.23771	0.24873	2.90005
0.730	1.00	0.46	2.28248	1.23009	0.23421	2.90694
0.735	1.00	0.46	2.28861	1.22257	0.21966	2.91364
0.740	1.00	0.46	2.29471	1.21515	0.20508	2.92015
0.745	1.00	0.46	2.30077	1.20781	0.19046	2.92647
0.750	1.00	0.46	2.30679	1.20056	0.17581	2.93261
0.755	1.00	0.46	2.31277	1.19339	0.16114	2.93857
0.760	1.00	0.46	2.31872	1.18632	0.14643	2.94436
0.765	1.00	0.46	2.32463	1.17932	0.13169	2.94998
0.770	1.00	0.46	2.33051	1.17241	0.11693	2.95544
0.775	1.00	0.46	2.33636	1.16557	0.10214	2.96074
0.780	1.00	0.46	2.34217	1.15882	0.08732	2.96588
0.785	1.00	0.46	2.34795	1.15215	0.07248	2.97087
0.790	1.00	0.46	2.35369	1.14555	0.05761	2.97572
0.795	1.00	0.46	2.35940	1.13902	0.04272	2.98043
0.800	1.00	0.46	2.36508	1.13257	0.02781	2.98499
0.805	1.00	0.46	2.37073	1.12619	0.01287	2.98943
DESEA HACER OTRO CALCULO S/N:						

Figura 23. Salida de datos de cálculo

Por ultimo pregunta si se quiere hacer otro calculo, si se contesta que no (N) termina la ejecución del programa.

PROGRAMA RADIAL

El programa fue codificado para calcular el coeficiente de uniformidad de Christiansen, de datos capturados de una prueba de aspersion por el método radial, el cual es explicado en el capítulo 3, y que utiliza polinomios de Lagrange para interpolar datos.

Funcionamiento

El programa se ejecuta al escribir su nombre de acuerdo al drive donde se encuentre residente el programa, por ejemplo en **C** sería

C:\RADIAL <ENTER>

Primero aparece un cuadro de presentación (Fig. 24), que al final indica que para continuar hay que oprimir la tecla **<ENTER>**

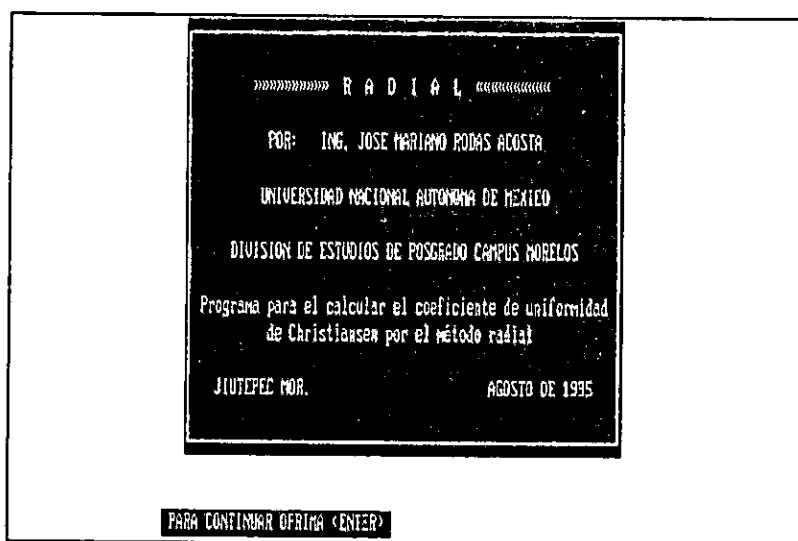


Figura 24. Pantalla de presentación del programa Radial

En segundo pide los datos de entrada (Fig. 25 y 26) que son los datos de la prueba de aspersión, estos son: Distancia total al último receptor de agua (LO), Distancia entre receptores de agua (IX). después pide las distancias a partir del aspersor a cada receptor de agua (X_j) y su valor correspondiente de agua capturada (FX_j).

```

DISTANCIA TOTAL AL ULTIMO RECEPTOR DE AGUA: 10
DISTANCIA ENTRE RECEPTORES DE AGUA: 2

DISTANCIAS APARTIR DEL ASPERSOR A RECEPTORES EN (m.)
X( 1 ):
? 2
X( 2 ):
? 4
X( 3 ):
? 6
X( 4 ):
? 8
X( 5 ):
? 10

```

Figura 25. Entrada de Datos de distribución de los captadores de precipitación

```

VALOR CORRESPONDIENTE DE AGUA CAPTURADA (mm.)
FX( 1 ):
? 40
FX( 2 ):
? 45
FX( 3 ):
? 50
FX( 4 ):
? 52
FX( 5 ):
? 40

```

Figura 26. Entrada de datos de la lámina capturada por los botes, por la prueba del método radial

En tercero inicia el calculo de las distancias a los receptores generados sintéticamente de acuerdo al método radial (L_i). Seguido calcula los valores de precipitación de la red de captadores generados artificialmente y que son calculados por el método de Lagrange.

VALORES DE PRECIPITACION INTERPOLADOS DE LA RED			
L(1 , 1):	2.828427	FX(1 , 1):	42.21833
L(1 , 2):	4.472136	FX(1 , 2):	46.16873
L(1 , 3):	6.324555	FX(1 , 3):	50.72136
L(1 , 4):	8.246211	FX(1 , 4):	51.58646
L(2 , 1):	4.472136	FX(2 , 1):	46.16873
L(2 , 2):	5.656854	FX(2 , 2):	49.17859
L(2 , 3):	7.211182	FX(2 , 3):	52.89422
L(2 , 4):	8.944272	FX(2 , 4):	49.8539
L(3 , 1):	6.324555	FX(3 , 1):	50.72136
L(3 , 2):	7.211182	FX(3 , 2):	52.89422
L(3 , 3):	8.485281	FX(3 , 3):	58.96483
L(3 , 4):	10	FX(3 , 4):	40
L(4 , 1):	8.246211	FX(4 , 1):	51.58646
L(4 , 2):	8.944272	FX(4 , 2):	49.8539
L(4 , 3):	10	FX(4 , 3):	40
COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD DE CHRISTIANSEN (%): 91.58751			
HARA OTRO CALCULO (S/N):			

Figura 27. Datos de Precipitaciones interpolados y el C.U.

por último calcula el coeficiente uniformidad (CU) de acuerdo a la formula de Christiansen y pregunta si se desea hacer otro calculo, en caso contrario termina el programa, (Fig. 27).

X. ANEXO

Tabla 5. Datos experimentales para el análisis de la uniformidad de riego.

PRESION (m.c.a.)	T P (min.)	N. BOTE (ml.)										Qt (m3/H)		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
10	90	28	22	21	17	10	12	39	14	1				
	90	30	20	20	16	9	12	35	14.5	0				
	90	27.5	21	19	16	8	11	24	15	0				
MEDIA	90	28.50	21.00	20.00	16.33	9.00	11.67	32.67	14.50	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00
A. PARC.(m2)		7.07	12.57	18.85	25.13	31.42	37.70	32.40	23.56	25.13	0.00	0.00	0.00	0.00
Q (m3/H)		0.03	0.03	0.05	0.05	0.04	0.06	0.13	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.287
LAM. PRESIP.		3.63	2.67	2.55	2.08	1.15	1.49	4.16	1.85	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00

PRESION (m.c.a.)	T P (min.)	N. BOTE (ml.)										Qt (m3.H)		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
15	90	26	10	9.5	9	8.5	10	16	29	31	15			
	90	25	11	10	9	8.5	11	17	30	30	12			
	90	27	12	9	8.5	9	10	18	30	30	14			
MEDIA	90	26.00	11.00	9.50	8.83	8.67	10.33	17.00	29.67	30.33	13.67	0.17		
A. PARC (m2)		7.07	12.57	18.85	25.13	31.42	37.70	43.98	37.11	26.70	28.27	45.36		
Q (m3/H)		0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.05	0.10	0.14	0.10	0.05	0.00	0.00	0.377
LAM. PRESIP		3.31	1.40	1.21	1.12	1.10	1.32	2.16	3.78	3.86	1.74	0.02		

PRESION (m.c.a.)	T P (min.)	N. BOTE (ml.)										Qt (m3 H)		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
20	90	30.7	16.8	14.6	13	13.17	12.5	16.09	18.29	24	19.75	0.07		
	90	33	19	16.5	14	14.5	12.5	15	21	23	21	2		
	90	32.5	17	16	13	13	13	14	21.5	22	22	2		
MEDIA	90	32.067	17.600	15.700	13.333	13.557	12.667	15.030	20.263	23.000	20.917	1.357		
A. PARC (m2)		7.07	12.57	18.85	25.13	31.42	37.70	43.98	50.27	41.82	29.85	31.42		
Q (m3/H)		0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06	0.08	0.13	0.12	0.08	0.01	0.01	0.449
LAM. PRESIP		4.08	2.24	2.00	1.70	1.73	1.61	1.91	2.58	2.93	2.66	0.17		

Tabla 6. Datos de filmaciones de gotas por el programa MAW, analizadas.

ARCHIVO	No. DE GOTA	PERIMETRO	AREA	DIAM. EQUIV.	DIAM. EQUIV.
		CM	CM2	CM	MM.
GOT-2-10	1	0.43	0.023	0.171	1.711
	2	0.48	0.02	0.160	1.596
	3	0.47	0.015	0.138	1.382
	4	0.725	0.045	0.239	2.394
	5	0.51	0.03	0.195	1.954
	6	0.701	0.035	0.211	2.111
	7	0.47	0.02	0.160	1.596
GOT15-10	1	0.455	0.015	0.138	1.382
	2	0.49	0.016	0.143	1.427
	3	0.41	0.0136	0.132	1.316
GOT25-10	1	1.016	0.066	0.290	2.899
	2	1.11	0.0841	0.327	3.272
	3	1.152	0.105	0.366	3.656
GOT35-10	1	0.663	0.035	0.211	2.111
GOT17-10	1	2.143	0.333	0.651	6.511
	2	1.076	0.063	0.283	2.832
	3	0.28	0.2	0.505	5.046
GOT27-10	1	0.9	0.07	0.299	2.985
	2	1.44	0.0136	0.132	1.316
GOT37-10	1	2.182	0.287	0.604	6.045
	2	1.078	0.093	0.344	3.441
	3	2.45	0.3765	0.692	6.924
GOT47-10	1	3.275	0.66	0.917	9.167
GOT12-15	1	0.69	0.043	0.234	2.340
	2	0.46	0.03	0.195	1.954
	3	0.61	0.04	0.226	2.257
	4	0.466	0.03	0.195	1.954
GOT22-15	1	0.543	0.026	0.182	1.819
	2	0.41	0.016	0.143	1.427
	3	0.57	0.033	0.205	2.050
GOT15-15	1	0.446	0.02	0.160	1.596
	2	0.496	0.026	0.182	1.819
	3	0.45	0.023	0.171	1.711
	4	0.44	0.023	0.171	1.711

Tabla 6. Datos de filmaciones de gotas por el programa MAW, analizadas, (Continuación).

ARCHIVO	No. DE GOTA	PERIMETRO	AREA	DIAM. EQUIV.	DIAM. EQUIV.
		CM	CM2	CM	MM.
GOT25-15	1	0.786	0.046	0.242	2.420
	2	0.85	0.056	0.267	2.670
	3	0.81	0.052	0.257	2.573
GOT18-15	1	1.386	0.166	0.460	4.597
	2	2.176	0.33	0.648	6.482
	3	2.216	0.376	0.692	6.919
GOT28-15	1	2.84	0.513	0.808	8.082
	2	1.646	0.193	0.496	4.957
	3	1.643	0.203	0.508	5.084
	4	1.76	0.203	0.508	5.084
GOT12-20	1	0.536	0.033	0.205	2.050
	2	0.657	0.0425	0.233	2.326
	3	0.563	0.333	0.651	6.511
	4	1.273	0.126	0.401	4.005
GOT22-20	1	0.563	0.036	0.214	2.141
	2	0.53	0.033	0.205	2.050
	3	0.48	0.033	0.205	2.050
	4	2.02	0.06	0.276	2.764
GOT15-20	1	1.253	0.123	0.396	3.957
	2	0.71	0.0466	0.244	2.436
	3	0.68	0.046	0.242	2.420
	4	0.31	0.15	0.437	4.370
GOT25-20	1	1.053	0.096	0.350	3.496
	2	2.45	0.43	0.740	7.399
	3	0.99	0.083	0.325	3.251
	4	1.31	0.126	0.401	4.005
	5	1	0.083	0.325	3.251
GOT18-20	1	1.053	0.096	0.350	3.496
	2	2.45	0.43	0.740	7.399
	3	0.99	0.083	0.325	3.251
	4	1.31	0.126	0.401	4.005
	5	1	0.083	0.325	3.251
GOT28-20	1	0.99	0.083	0.325	3.251
	2	0.926	0.083	0.325	3.251
	3	0.733	0.053	0.260	2.598

Tabla 7. Muestra de datos de archivos de filmaciones de gotas del programa MAP; Tiempo en seg., D.A. = Distancia recorrida (cm), T.A. = Tiempo acumulado (seg.) y V.M. = Velocidad media (cm/seg.).

GOT-2-10 MAP

N. GOTA	1 000			2 000			3 00			4 00			5 0			6 00			7 00				
	TIEMPO	D A	T A	V M	D A	T A	V M	D A	T A	V M	D A	T A	V M	D A	T A	V M	D A	T A	V M	D A	T A	V M	
0																							
0.01	2.290	0.010	229.036																				
0.02	4.532	0.020	228.590																				
0.03	6.877	0.030	229.233	2.031	0.010	203.066	1.36	0.01	135.6														
0.04	9.187	0.040	229.184	3.903	0.020	195.169	2.76	0.02	138.2	1.87	0.01	187.5											
0.05	11.510	0.050	230.193	5.723	0.030	190.780	4.08	0.03	135.5	3.75	0.02	187.4	2.3	0.01	229	2.08	0.01	208	1.8	0.01	178		
0.06				7.598	0.040	189.957	5.37	0.04	134.2	5.52	0.03	184.0	4.6	0.0	232	4.10	0.02	205	3.5	0.0	175		
0.07				9.421	0.050	188.425	6.78	0.05	135.5	7.29	0.04	182.2	7.0	0.0	234	6.30	0.03	210	5.4	0.0	179		

GOT15-10 MAP

N. GOTA	1 000			2 000			3 00			
	TIEMPO	D A	T A	V M	D A	T A	V M	D A	T A	V M
0										
0.001	0.14	0.001	141.000							
0.002	0.282	0.002	141.000							
0.003	0.431	0.003	143.542							
0.004	0.525	0.004	131.157	0.142	0.001	142.258				
0.005	0.780	0.005	151.925	0.289	0.002	144.561	0.28	0.00	277.6	
0.006	0.854	0.006	142.271	0.412	0.003	137.625	0.55	0.00	276.6	
0.007	1.002	0.007	143.179	0.569	0.004	142.365	0.83	0.00	275.0	
0.008	1.151	0.008	143.860	0.708	0.005	141.235	1.11	0.00	276.3	
0.009	1.292	0.009	143.542	0.828	0.006	138.000	1.38	0.01	275.0	
0.01	1.397	0.010	139.698	0.981	0.007	140.200	1.67	0.01	278.6	

GOT25-10 MAP

N. GOTA	1 000			2 000			3 00			
	TIEMPO	D A	T A	V M	D A	T A	V M	D A	T A	V M
0										
0.001	0.443	0.001	443.397							
0.002	0.913	0.002	456.699							
0.003	1.357	0.003	452.265							
0.004	1.689	0.004	422.284							
0.005				0.470	0.001	470.000	0.43	0.00	431.3	
0.006				0.970	0.002	484.808	0.86	0.00	430.2	
0.007				1.440	0.003	478.872	1.31	0.00	435.0	

Tabla 7. Muestra de datos de archivos de filmaciones de gotas del programa MAP; Tiempo en seg., D.A. = Distancia recorrida (cm), T.A. = Tiempo acumulado (seg.) y V.M. = Velocidad media (cm/seg.), (Continuación).

GOT35-10 MAP

N GOTA	1 000		
TIEMPO	D A	T A	V M
0			
0 001	0 358	0 001	357 941
0 002	0 737	0 002	368 434
0 003	1 116	0 003	371 931
0 004	1 431	0 004	357 770
0 005			
0 006			
0 007			
0 008			
0 009			

GOT17-10 MAP

N GOTA	1 000			2 000			3 000		
TIEMPO	D A	T A	V M	D A	T A	V M	D A	T A	V M
0									
0 001	0 715	0 001	715 000	0 473	0 001	473 207			
0 002	1 433	0 002	716 474	0 997	0 002	498 627	0 61	0 00	608 6
0 003	2 148	0 003	715 983	1 533	0 003	511 086	1 22	0 00	611 5
0 004	2 801	0 004	700 298	2 008	0 004	501 618	1 83	0 00	610 5
0 005	3 516	0 005	703 238	2 608	0 005	521 147	2 46	0 00	615 5
0 008	4 234	0 008	705 690	3 205	0 008	534 168	3 01	0 01	602 2
0 007	4 949	0 007	707 020	3 741	0 007	534 430	3 71	0 01	618 2
0 008	5 599	0 008	699 892	4 277	0 008	534 627	4 23	0 01	604 1
0 009				4 876	0 009	541 809	4 80	0 01	612 1
0 01				5 412	0 010	541 229	5 47	0 01	607 2
0 011				5 938	0 011	539 667	6 15	0 01	615 3
0 012				6 472	0 012	539 361	6 80	0 01	608 5
0 013				6 946	0 013	534 273	7 26	0 01	605 2
0 014				7 482	0 014	534 396	7 94	0 01	610 5

GOT27-10 MAP

N GOTA	1 000			2 000		
TIEMPO	D A	T A	V M	D A	T A	V M
0						
0 001	0 460	0 001	459 619	0 599	0 001	599 270
0 002	0 919	0 002	459 619	1 123	0 002	561 659
0 003	1 455	0 003	485 081	1 659	0 003	553 107
0 004	1 851	0 004	462 656	2 195	0 004	548 831
0 005	2 262	0 005	452 344	2 719	0 005	543 874
0 006	2 721	0 006	453 556	3 243	0 006	540 570
0 007	3 195	0 007	456 364	3 779	0 007	539 917

Tabla 7. Muestra de datos de archivos de filmaciones de gotas del programa MAP; Tiempo en seg., D.A. = Distancia recorrida (cm), T.A.= Tiempo acumulado (seg.) y V.M. = Velocidad media (cm/seg.), (Continuación).

GOT27-10 MAP

N. GOTAS	1 000			2 000		
	D A	T A	V M	D A	T A	V M
0 008	3 654	0 008	456 771	4 315	0 008	539 428
0 009	4 065	0 009	451 696	4 839	0 009	537 719
0 01	4 589	0 010	458 931	5 375	0 010	537 548
0 011	5 084	0 011	462 212			
0 012	5 480	0 012	456 643			

GOT27-10 MAP

N. GOTAS	1 000			2 000		
	D A	T A	V M	D A	T A	V M
0 013	5 953	0 013	457 917			
0 014	6 413	0 014	458 036			
0 015	6 824	0 015	454 909			
0 016	7 283	0 016	455 203			
0 017	7 756	0 017	456 262			

GOT37-10 MAP

N. GOTAS	1 000			2 000			3 000		
	D A	T A	V M	D A	T A	V M	D A	T A	V M
0									
0.001	0 749	0 001	749 083						
0.002	1 553	0 002	776 541						
0.003	2 491	0 003	830 361						
0.004	3 164	0 004	791 106						
0.005	3 971	0 005	794 242						
0.006	4 775	0 006	795 869	0 603	0 001	603 000			
0.007	5 579	0 007	797 030	1 210	0 002	604 855			
0.008	6 319	0 008	789 906	1 750	0 003	583 294			
0.009	7 190	0 009	798 917	2 302	0 004	575 595			
0.01	7 927	0 010	792 725	2 909	0 005	581 818			
0.011	8 731	0 011	793 750	3 449	0 006	574 877			
0.012	9 738	0 012	811 540	3 989	0 007	569 919			
0.013	10 542	0 013	810 960	4 596	0 008	574 518			
0.014	11 346	0 014	810 463	5 136	0 009	570 702			
0.015	12 220	0 015	814 670	5 689	0 010	568 881			
0.016	13 024	0 016	814 003	6 292	0 011	571 983			
0.017				6 844	0 012	570 359	0 83	0 00	828 6
0.018				7 384	0 013	568 037	1 66	0 00	829 3

Tabla 8. Muestra de datos de archivo ALCANCE.DAT generado por el programa GOTASP.BAS

PRESION = 10 MCA		ANG. DE TRAY. = 11 GRAD.					
TIEMPO	COEF. A.	DIAMETRO	DIST. HOR.	VEL HOR.	DIST. VERT.	VEL. VERT.	VEL ABS.
(SEG.)	(ADIM.)	(MM.)	(M.)	(M./SEG.)	(M.)	(M./SEG.)	(M./SEG.)
0.805	0.080	6.393	7.876	7.388	0.018	5.066	8.958
0.810	0.100	4.775	7.325	6.411	0.014	4.981	8.119
0.815	0.130	3.808	6.865	5.654	0.010	4.897	7.480
0.820	0.150	3.165	6.473	5.051	0.006	4.816	6.979
0.815	0.180	2.707	6.088	4.596	0.002	4.738	6.600
0.815	0.200	2.364	5.775	4.202	0.021	4.634	6.255
0.820	0.230	2.098	5.518	3.854	0.017	4.562	5.972
0.825	0.250	1.885	5.288	3.556	0.013	4.491	5.728
0.820	0.280	1.711	5.048	3.328	0.009	4.423	5.535
0.825	0.300	1.567	4.863	3.101	0.005	4.356	5.347
0.830	0.330	1.445	4.694	2.901	0.001	4.291	5.180
0.830	0.350	1.340	4.526	2.736	0.018	4.210	5.021
0.825	0.380	1.250	4.358	2.602	0.013	4.150	4.898
0.830	0.400	1.170	4.229	2.457	0.009	4.091	4.772
0.835	0.430	1.101	4.109	2.326	0.005	4.034	4.656
0.840	0.450	1.039	3.997	2.208	0.001	3.978	4.549
0.840	0.480	0.983	3.882	2.110	0.016	3.911	4.444
0.835	0.500	0.933	3.765	2.031	0.012	3.859	4.360
0.840	0.530	0.888	3.674	1.938	0.008	3.808	4.273
0.845	0.550	0.847	3.589	1.853	0.003	3.758	4.190
0.845	0.570	0.810	3.500	1.783	0.018	3.701	4.108
0.840	0.600	0.776	3.407	1.727	0.013	3.654	4.042
0.845	0.620	0.744	3.336	1.658	0.009	3.609	3.971
0.850	0.650	0.715	3.269	1.594	0.005	3.565	3.905
0.855	0.670	0.688	3.204	1.534	0.000	3.521	3.841
0.855	0.700	0.663	3.136	1.485	0.013	3.472	3.777
0.860	0.720	0.640	3.078	1.432	0.009	3.432	3.718
0.855	0.750	0.619	3.009	1.396	0.005	3.392	3.668
0.860	0.770	0.598	2.957	1.349	0.000	3.353	3.614
0.860	0.800	0.579	2.900	1.311	0.013	3.310	3.560
0.865	0.820	0.562	2.852	1.268	0.008	3.274	3.511
0.870	0.850	0.545	2.806	1.228	0.004	3.238	3.463
0.860	0.870	0.529	2.744	1.208	0.015	3.199	3.419
0.865	0.900	0.514	2.702	1.172	0.011	3.165	3.375
0.870	0.920	0.500	2.662	1.137	0.007	3.132	3.332
0.875	0.950	0.487	2.623	1.103	0.002	3.099	3.290
0.875	0.970	0.474	2.580	1.077	0.013	3.065	3.248
0.880	1.000	0.462	2.545	1.047	0.009	3.034	3.209
0.875	1.020	0.451	2.500	1.029	0.004	3.004	3.175
0.875	1.050	0.440	2.461	1.006	0.015	2.972	3.138
0.880	1.070	0.429	2.429	0.979	0.010	2.943	3.102
0.885	1.100	0.419	2.398	0.954	0.006	2.915	3.067
0.890	1.120	0.410	2.368	0.929	0.001	2.888	3.034
0.890	1.150	0.401	2.334	0.910	0.011	2.859	3.001
0.895	1.170	0.392	2.306	0.888	0.007	2.833	2.969
0.890	1.200	0.384	2.270	0.875	0.002	2.808	2.941
0.890	1.220	0.376	2.240	0.858	0.012	2.781	2.910
0.895	1.250	0.368	2.214	0.838	0.008	2.757	2.881
0.900	1.270	0.361	2.189	0.818	0.003	2.733	2.853
0.900	1.300	0.354	2.161	0.803	0.012	2.708	2.825

Tabla 8. Muestra de datos de archivo ALCANCE.DAT generado por el programa GOTASP.BAS.
(Continuación).

PRESION = 10 MCA		ANG. DE TRAY. = 11 GRAD.					
TIEMPO	COEF. A.	DIAMETRO	DIST. HOR.	VEL HOR.	DIST. VERT.	VEL. VERT.	VEL ABS.
(seg.)	(ADIM.)	(mm.)	(m.)	(m./seg.)	(m.)	(m./seg.)	(m./seg.)
0.905	1.320	0.347	2.138	0.785	0.008	2.685	2.798
0.910	1.350	0.341	2.115	0.767	0.003	2.663	2.771
0.900	1.370	0.335	2.082	0.762	0.012	2.640	2.748
0.905	1.400	0.328	2.061	0.745	0.008	2.619	2.723
0.910	1.420	0.323	2.040	0.729	0.003	2.598	2.698
0.910	1.450	0.317	2.016	0.717	0.012	2.576	2.674
0.915	1.470	0.312	1.996	0.702	0.007	2.556	2.651
0.920	1.500	0.306	1.977	0.687	0.003	2.536	2.628
0.920	1.520	0.301	1.955	0.677	0.011	2.516	2.606
0.925	1.550	0.296	1.937	0.663	0.006	2.498	2.584
0.920	1.570	0.291	1.912	0.656	0.002	2.479	2.564
0.920	1.600	0.287	1.892	0.646	0.010	2.460	2.544
0.925	1.620	0.282	1.875	0.634	0.005	2.442	2.523
0.930	1.650	0.278	1.858	0.621	0.001	2.425	2.503
0.930	1.670	0.274	1.839	0.612	0.008	2.407	2.484
0.935	1.700	0.270	1.824	0.601	0.004	2.391	2.465
0.935	1.720	0.266	1.805	0.592	0.011	2.374	2.446
0.940	1.750	0.262	1.790	0.581	0.007	2.357	2.428
0.935	1.770	0.258	1.770	0.577	0.002	2.342	2.411
0.935	1.800	0.255	1.753	0.569	0.009	2.326	2.394
0.940	1.820	0.251	1.739	0.559	0.005	2.310	2.377
0.945	1.850	0.248	1.725	0.548	0.001	2.295	2.360
0.945	1.870	0.244	1.709	0.541	0.008	2.280	2.344
0.950	1.900	0.241	1.696	0.532	0.003	2.266	2.327
0.950	1.920	0.238	1.680	0.525	0.010	2.251	2.312
0.955	1.950	0.235	1.668	0.516	0.005	2.237	2.296
0.960	1.970	0.232	1.655	0.507	0.001	2.223	2.281
0.960	2.000	0.229	1.641	0.501	0.007	2.210	2.266
0.955	2.020	0.226	1.624	0.498	0.003	2.196	2.252
0.955	2.050	0.223	1.610	0.492	0.009	2.183	2.238
0.960	2.070	0.220	1.598	0.484	0.005	2.170	2.224
0.965	2.100	0.218	1.587	0.476	0.000	2.158	2.210
0.965	2.120	0.215	1.574	0.470	0.007	2.145	2.196
0.970	2.150	0.213	1.563	0.463	0.002	2.133	2.182
0.970	2.170	0.210	1.550	0.458	0.008	2.121	2.169
0.975	2.200	0.208	1.540	0.450	0.004	2.109	2.156
0.975	2.220	0.205	1.528	0.446	0.010	2.097	2.144
0.980	2.250	0.203	1.518	0.439	0.005	2.086	2.131
0.975	2.270	0.201	1.504	0.436	0.001	2.074	2.120
0.975	2.300	0.199	1.492	0.432	0.007	2.063	2.108
0.980	2.320	0.196	1.482	0.425	0.002	2.052	2.096
0.980	2.350	0.194	1.471	0.421	0.008	2.041	2.084
0.985	2.380	0.192	1.462	0.414	0.004	2.031	2.072
0.985	2.400	0.190	1.451	0.410	0.009	2.020	2.061
0.990	2.430	0.188	1.442	0.404	0.005	2.010	2.050
0.995	2.450	0.186	1.433	0.398	0.000	2.000	2.039
0.995	2.480	0.184	1.423	0.394	0.006	1.990	2.028
1.000	2.500	0.182	1.415	0.388	0.001	1.980	2.017
0.990	2.530	0.181	1.401	0.388	0.007	1.970	2.008
0.995	2.550	0.179	1.392	0.383	0.002	1.960	1.997
0.995	2.580	0.177	1.383	0.379	0.008	1.951	1.987
1.000	2.600	0.175	1.375	0.374	0.003	1.941	1.977
1.000	2.630	0.174	1.365	0.370	0.008	1.932	1.967

Tabla 8. Muestra de datos de archivo ALCANCE.DAT generado por el programa GOTASP.BAS.
(Continuación).

PRESION = 10 MCA		ANG. DE TRAY. = 11 GRAD.					
TIEMPO	COEF. A.	DIAMETRO	DIST. HOR.	VEL HOR.	DIST. VERT.	VEL. VERT.	VEL ABS.
(seg.)	(ADIM.)	(mm.)	(m.)	(m./seg.)	(m.)	(m./seg.)	(m./seg.)
1.005	2.650	0.172	1.358	0.365	0.004	1.923	1.958
1.005	2.680	0.170	1.348	0.362	0.009	1.914	1.948
1.010	2.700	0.169	1.341	0.357	0.005	1.905	1.939
1.015	2.730	0.167	1.334	0.352	0.000	1.897	1.929
1.015	2.750	0.166	1.325	0.349	0.005	1.888	1.920
1.020	2.780	0.164	1.318	0.344	0.001	1.880	1.911
1.020	2.800	0.163	1.309	0.341	0.006	1.871	1.902
1.015	2.830	0.161	1.299	0.340	0.001	1.863	1.894
1.015	2.850	0.160	1.291	0.337	0.006	1.855	1.885
1.020	2.880	0.158	1.284	0.333	0.002	1.847	1.876
1.020	2.900	0.157	1.276	0.330	0.006	1.839	1.868
1.025	2.930	0.156	1.269	0.325	0.002	1.831	1.860
1.025	2.950	0.154	1.262	0.323	0.007	1.823	1.852
1.030	2.980	0.153	1.255	0.319	0.002	1.816	1.843
1.030	3.000	0.152	1.248	0.316	0.007	1.808	1.835
1.035	3.030	0.150	1.242	0.312	0.003	1.801	1.827
1.035	3.050	0.149	1.234	0.309	0.007	1.793	1.820
1.040	3.080	0.148	1.228	0.306	0.003	1.786	1.812
1.040	3.100	0.147	1.221	0.303	0.007	1.779	1.804
1.045	3.130	0.145	1.215	0.299	0.003	1.772	1.797
1.045	3.150	0.144	1.208	0.297	0.007	1.765	1.789
1.040	3.180	0.143	1.199	0.296	0.003	1.758	1.782
1.040	3.200	0.142	1.192	0.294	0.007	1.751	1.775
1.045	3.230	0.141	1.187	0.290	0.003	1.744	1.768
1.045	3.250	0.140	1.180	0.288	0.007	1.737	1.761
1.050	3.280	0.139	1.175	0.285	0.003	1.731	1.754
1.050	3.300	0.138	1.168	0.282	0.007	1.724	1.747
1.055	3.330	0.137	1.163	0.279	0.002	1.718	1.740
1.055	3.350	0.136	1.156	0.277	0.007	1.711	1.733
1.060	3.380	0.135	1.151	0.274	0.002	1.705	1.727
1.060	3.400	0.134	1.145	0.272	0.006	1.699	1.720
1.065	3.430	0.133	1.140	0.269	0.002	1.692	1.713
1.065	3.450	0.132	1.134	0.267	0.006	1.686	1.707
1.070	3.480	0.131	1.129	0.264	0.002	1.680	1.701
1.070	3.500	0.130	1.123	0.262	0.006	1.674	1.694
1.065	3.530	0.129	1.116	0.261	0.001	1.668	1.688
1.065	3.550	0.128	1.110	0.259	0.005	1.662	1.682
1.070	3.580	0.127	1.105	0.256	0.001	1.656	1.676
1.070	3.600	0.126	1.100	0.255	0.005	1.651	1.670
1.075	3.630	0.125	1.095	0.252	0.000	1.645	1.664
1.075	3.650	0.124	1.089	0.250	0.004	1.639	1.658
1.075	3.680	0.123	1.084	0.248	0.008	1.634	1.653
1.080	3.700	0.123	1.080	0.246	0.004	1.628	1.647
1.080	3.730	0.122	1.074	0.244	0.008	1.623	1.641
1.085	3.750	0.121	1.070	0.241	0.003	1.617	1.635
1.085	3.780	0.120	1.065	0.240	0.007	1.612	1.630
1.090	3.800	0.119	1.060	0.237	0.003	1.607	1.624
1.090	3.830	0.118	1.055	0.236	0.006	1.601	1.619
1.095	3.850	0.118	1.051	0.233	0.002	1.596	1.613
1.095	3.880	0.117	1.046	0.232	0.006	1.591	1.608
1.100	3.900	0.116	1.042	0.229	0.001	1.586	1.602
1.090	3.930	0.115	1.035	0.230	0.005	1.581	1.598
1.095	3.950	0.115	1.031	0.227	0.001	1.576	1.592

Tabla 8. Muestra de datos de archivo ALCANCE.DAT generado por el programa GOTASP.BAS.
(Continuación).

PRESION = 10 MCA		ANG. DE TRAY. = 11 GRAD.					
TIEMPO	COEF. A.	DIAMETRO	DIST. HOR.	VEL HOR.	DIST. VERT.	VEL. VERT.	VEL ABS.
(seg.)	(ADIM.)	(mm.)	(m.)	(m./seg.)	(m.)	(m./seg.)	(m./seg.)
1.095	3.980	0.114	1.026	0.226	0.004	1.571	1.587
1.095	4.000	0.113	1.021	0.224	0.008	1.566	1.582
1.100	4.030	0.113	1.017	0.222	0.003	1.561	1.577
1.100	4.050	0.112	1.013	0.221	0.007	1.556	1.572
1.105	4.080	0.111	1.009	0.218	0.003	1.552	1.567
1.105	4.100	0.110	1.004	0.217	0.006	1.547	1.562
1.110	4.130	0.110	1.001	0.215	0.002	1.542	1.557
1.110	4.150	0.109	0.996	0.214	0.005	1.537	1.552
1.115	4.180	0.108	0.993	0.211	0.001	1.533	1.547
1.115	4.200	0.108	0.988	0.210	0.004	1.528	1.543
1.115	4.230	0.107	0.984	0.209	0.008	1.524	1.538
1.120	4.250	0.106	0.980	0.207	0.003	1.519	1.533
1.120	4.280	0.106	0.976	0.206	0.007	1.515	1.529
1.125	4.300	0.105	0.973	0.204	0.002	1.510	1.524
1.125	4.330	0.105	0.968	0.202	0.006	1.506	1.520
1.130	4.350	0.104	0.965	0.200	0.001	1.502	1.515
1.120	4.380	0.103	0.959	0.201	0.005	1.497	1.511
1.125	4.400	0.103	0.956	0.199	0.000	1.493	1.506
1.125	4.430	0.102	0.952	0.198	0.004	1.489	1.502
1.125	4.450	0.102	0.947	0.197	0.007	1.485	1.498
1.130	4.480	0.101	0.944	0.195	0.002	1.481	1.493
1.130	4.500	0.100	0.940	0.194	0.006	1.476	1.489
1.135	4.530	0.100	0.937	0.192	0.001	1.472	1.485
1.135	4.550	0.099	0.933	0.191	0.005	1.468	1.481
1.140	4.580	0.099	0.930	0.189	0.000	1.464	1.476
1.140	4.600	0.098	0.926	0.188	0.003	1.460	1.472
1.140	4.630	0.098	0.923	0.187	0.006	1.456	1.468
1.145	4.650	0.097	0.920	0.185	0.002	1.452	1.464
1.145	4.680	0.097	0.916	0.184	0.005	1.449	1.460
1.150	4.700	0.096	0.913	0.182	0.001	1.445	1.456
1.150	4.730	0.096	0.909	0.182	0.004	1.441	1.452
1.150	4.750	0.095	0.906	0.181	0.007	1.437	1.448
1.155	4.780	0.095	0.903	0.179	0.003	1.433	1.444
1.155	4.800	0.094	0.899	0.178	0.006	1.430	1.441
1.160	4.830	0.094	0.897	0.176	0.002	1.426	1.437
1.150	4.850	0.093	0.891	0.177	0.005	1.422	1.433
1.155	4.880	0.093	0.889	0.175	0.000	1.419	1.429
1.155	4.900	0.092	0.885	0.174	0.003	1.415	1.426
1.155	4.930	0.092	0.882	0.174	0.006	1.411	1.422
1.160	4.950	0.091	0.879	0.172	0.002	1.408	1.418
1.160	4.980	0.091	0.876	0.171	0.005	1.404	1.415
1.165	5.000	0.090	0.873	0.169	0.001	1.401	1.411
1.165	5.030	0.090	0.870	0.169	0.004	1.397	1.407
1.165	5.050	0.089	0.866	0.168	0.006	1.394	1.404
1.170	5.080	0.089	0.864	0.166	0.002	1.390	1.400
1.170	5.100	0.089	0.861	0.166	0.005	1.387	1.397
1.175	5.130	0.088	0.858	0.164	0.001	1.384	1.393
1.175	5.150	0.088	0.855	0.163	0.004	1.380	1.390
1.175	5.180	0.087	0.852	0.162	0.006	1.377	1.386
1.180	5.200	0.087	0.849	0.161	0.002	1.374	1.383
1.180	5.230	0.086	0.846	0.160	0.005	1.370	1.380
1.185	5.250	0.086	0.844	0.159	0.001	1.367	1.376

Tabla 8. Muestra de datos de archivo ALCANCE.DAT generado por el programa GOTASP.BAS.
(Continuación).

PRESION = 10 MCA		ANG. DE TRAY. = 11 GRAD.					
TIEMPO	COEF. A.	DIAMETRO	DIST. HOR.	VEL HOR.	DIST. VERT.	VEL. VERT.	VEL ABS.
(seg.)	(ADIM.)	(mm.)	(m.)	(m./seg.)	(m.)	(m./seg.)	(m./seg.)
1.185	5.280	0.086	0.841	0.158	0.003	1.364	1.373
1.185	5.300	0.085	0.838	0.157	0.006	1.360	1.370
1.190	5.330	0.085	0.835	0.156	0.002	1.357	1.366
1.190	5.350	0.084	0.832	0.155	0.005	1.354	1.363
1.195	5.380	0.084	0.830	0.154	0.001	1.351	1.360
1.185	5.400	0.084	0.826	0.154	0.003	1.348	1.357
1.185	5.430	0.083	0.823	0.154	0.006	1.345	1.353

Tabla 9. Muestra de datos de archivo TRAYEC.DAT generado por el programa GOTASP.BAS

PRESION = 10		ANGULO DE TRAYEC. = 11			CD = .97	
TIEMPO	COEF. A.	DIST.X	VEL. X	DIST. Y	VEL. Y	VEL. ABS.
(seg.)	(adim.)	(m.)	(m/seg.)	(m.)	(m/seg.)	(m/seg.)
0.000	3	0.000	13.337	1.140	2.593	13.587
0.005	3	0.061	11.114	1.153	2.448	11.380
0.010	3	0.112	9.526	1.165	2.314	9.803
0.015	3	0.157	8.335	1.176	2.189	8.618
0.020	3	0.196	7.409	1.186	2.072	7.693
0.025	3	0.231	6.668	1.197	1.962	6.950
0.030	3	0.263	6.061	1.206	1.858	6.340
0.035	3	0.292	5.556	1.215	1.760	5.828
0.040	3	0.319	5.129	1.224	1.667	5.393
0.045	3	0.343	4.762	1.232	1.578	5.017
0.050	3	0.366	4.445	1.239	1.494	4.689
0.055	3	0.388	4.167	1.247	1.413	4.400
0.060	3	0.408	3.922	1.254	1.336	4.143
0.065	3	0.427	3.704	1.260	1.261	3.913
0.070	3	0.445	3.509	1.266	1.190	3.705
0.075	3	0.462	3.334	1.272	1.121	3.517
0.080	3	0.478	3.175	1.277	1.054	3.345
0.085	3	0.494	3.031	1.283	0.989	3.188
0.090	3	0.509	2.899	1.287	0.927	3.043
0.095	3	0.523	2.778	1.292	0.865	2.910
0.100	3	0.537	2.667	1.296	0.806	2.786
0.105	3	0.550	2.564	1.300	0.748	2.671
0.110	3	0.562	2.469	1.303	0.691	2.564
0.115	3	0.574	2.381	1.307	0.635	2.464
0.120	3	0.586	2.299	1.310	0.581	2.371
0.125	3	0.597	2.222	1.313	0.527	2.284
0.130	3	0.608	2.151	1.315	0.474	2.202
0.135	3	0.619	2.083	1.317	0.422	2.126
0.140	3	0.629	2.020	1.319	0.371	2.054
0.145	3	0.639	1.961	1.321	0.320	1.987
0.150	3	0.649	1.905	1.323	0.270	1.924
0.155	3	0.658	1.852	1.324	0.220	1.865
0.160	3	0.667	1.802	1.325	0.170	1.810
0.165	3	0.676	1.754	1.325	0.121	1.759
0.170	3	0.685	1.709	1.326	0.071	1.711
0.175	3	0.693	1.667	1.326	0.022	1.667
0.175	3	0.693	1.667	1.326	0.022	1.667
0.180	3	0.701	1.626	1.326	0.071	1.628
0.185	3	0.710	1.587	1.325	0.120	1.592
0.190	3	0.717	1.550	1.325	0.169	1.560
0.195	3	0.725	1.515	1.324	0.218	1.531
0.200	3	0.733	1.482	1.323	0.266	1.505
0.205	3	0.740	1.449	1.321	0.313	1.483
0.210	3	0.747	1.418	1.319	0.361	1.464
0.215	3	0.754	1.389	1.317	0.408	1.448
0.220	3	0.761	1.361	1.315	0.454	1.434
0.225	3	0.768	1.333	1.313	0.500	1.424
0.230	3	0.774	1.307	1.310	0.545	1.416
0.235	3	0.781	1.282	1.307	0.589	1.411
0.240	3	0.787	1.258	1.304	0.632	1.408

Tabla 9. Muestra de datos de archivo TRAYEC.DAT generado por el programa GOTASP.BAS, (Continuación)

PRESION = 10		ANGULO DE TRAYEC. = 11			CD = 97	
TIEMPO	COEF. A.	DIST. X	VEL. X	DIST. Y	VEL. Y	VEL. ABS.
(seg.)	(adim.)	(m.)	(m/seg.)	(m.)	(m/seg.)	(m/seg.)
0.245	3	0.793	1.235	1.301	0.675	1.407
0.250	3	0.799	1.212	1.298	0.717	1.408
0.255	3	0.805	1.191	1.294	0.758	1.411
0.260	3	0.811	1.170	1.290	0.798	1.416
0.265	3	0.817	1.149	1.286	0.837	1.422
0.270	3	0.823	1.130	1.282	0.875	1.429
0.275	3	0.828	1.111	1.277	0.912	1.437
0.280	3	0.834	1.093	1.273	0.948	1.447
0.285	3	0.839	1.075	1.268	0.983	1.457
0.290	3	0.845	1.058	1.263	1.017	1.468
0.295	3	0.850	1.042	1.258	1.050	1.479
0.300	3	0.855	1.026	1.252	1.082	1.491
0.305	3	0.860	1.010	1.247	1.113	1.503
0.310	3	0.865	0.995	1.241	1.143	1.515
0.315	3	0.870	0.980	1.235	1.172	1.528
0.320	3	0.875	0.966	1.229	1.200	1.540
0.325	3	0.880	0.952	1.223	1.227	1.553
0.330	3	0.885	0.939	1.217	1.253	1.566
0.335	3	0.889	0.926	1.211	1.278	1.578
0.340	3	0.894	0.913	1.204	1.302	1.590
0.345	3	0.898	0.901	1.198	1.325	1.602
0.350	3	0.903	0.889	1.191	1.347	1.614
0.355	3	0.907	0.877	1.184	1.369	1.626
0.360	3	0.912	0.866	1.177	1.389	1.637
0.365	3	0.916	0.855	1.170	1.409	1.648
0.370	3	0.920	0.844	1.163	1.428	1.659
0.375	3	0.924	0.833	1.156	1.446	1.669
0.380	3	0.928	0.823	1.149	1.463	1.679
0.385	3	0.933	0.813	1.142	1.480	1.688
0.390	3	0.937	0.803	1.134	1.496	1.698
0.395	3	0.941	0.794	1.127	1.511	1.707
0.400	3	0.945	0.784	1.119	1.525	1.715
0.405	3	0.948	0.775	1.111	1.539	1.723
0.410	3	0.952	0.766	1.104	1.552	1.731
0.415	3	0.956	0.758	1.096	1.565	1.739
0.420	3	0.960	0.749	1.088	1.577	1.746
0.425	3	0.964	0.741	1.080	1.588	1.753
0.430	3	0.967	0.733	1.072	1.599	1.759
0.435	3	0.971	0.725	1.064	1.610	1.765
0.440	3	0.974	0.717	1.056	1.620	1.771
0.445	3	0.978	0.709	1.048	1.629	1.777
0.450	3	0.982	0.702	1.040	1.638	1.782
0.455	3	0.985	0.694	1.032	1.647	1.787
0.460	3	0.989	0.687	1.023	1.655	1.792
0.465	3	0.992	0.680	1.015	1.663	1.796
0.470	3	0.995	0.673	1.007	1.670	1.801
0.475	3	0.999	0.667	0.998	1.677	1.805
0.480	3	1.002	0.660	0.990	1.684	1.809
0.485	3	1.005	0.654	0.981	1.690	1.812
0.490	3	1.009	0.647	0.973	1.696	1.816
0.495	3	1.012	0.641	0.964	1.702	1.819
0.500	3	1.015	0.635	0.956	1.707	1.822
0.505	3	1.018	0.629	0.947	1.713	1.824

Tabla 9. Muestra de datos de archivo TRAYEC.DAT generado por el programa GOTASP.BAS, (Continuación)

PRESION = 10		ANGULO DE TRAYEC. = 11			CD = .97	
TIEMPO	COEF. A.	DIST. X	VEL. X	DIST. Y	VEL. Y	VEL. ABS.
(seg.)	(adim.)	(m.)	(m/seg.)	(m.)	(m/seg.)	(m/seg.)
0.510	3	1.021	0.623	0.939	1.718	1.827
0.515	3	1.024	0.617	0.930	1.722	1.830
0.520	3	1.027	0.612	0.922	1.727	1.832
0.525	3	1.030	0.606	0.913	1.731	1.834
0.530	3	1.033	0.601	0.904	1.735	1.836
0.535	3	1.036	0.595	0.896	1.739	1.838
0.540	3	1.039	0.590	0.887	1.742	1.839
0.545	3	1.042	0.585	0.878	1.746	1.841
0.550	3	1.045	0.580	0.869	1.749	1.843
0.555	3	1.048	0.575	0.861	1.752	1.844
0.560	3	1.051	0.570	0.852	1.755	1.845
0.565	3	1.054	0.565	0.843	1.758	1.846
0.570	3	1.057	0.560	0.834	1.760	1.847
0.575	3	1.059	0.556	0.826	1.763	1.848
0.580	3	1.062	0.551	0.817	1.765	1.849
0.585	3	1.065	0.546	0.808	1.768	1.850
0.590	3	1.068	0.542	0.799	1.770	1.851
0.595	3	1.070	0.538	0.790	1.772	1.851
0.600	3	1.073	0.533	0.781	1.774	1.852
0.605	3	1.076	0.529	0.772	1.775	1.853
0.610	3	1.078	0.525	0.764	1.777	1.853
0.615	3	1.081	0.521	0.755	1.779	1.853
0.620	3	1.084	0.517	0.746	1.780	1.854
0.625	3	1.086	0.513	0.737	1.782	1.854
0.630	3	1.089	0.509	0.728	1.783	1.854
0.635	3	1.091	0.505	0.719	1.784	1.855
0.640	3	1.094	0.501	0.710	1.786	1.855
0.645	3	1.096	0.498	0.701	1.787	1.855
0.650	3	1.099	0.494	0.692	1.788	1.855
0.655	3	1.101	0.490	0.683	1.789	1.855
0.660	3	1.104	0.487	0.674	1.790	1.855
0.665	3	1.106	0.483	0.665	1.791	1.855
0.670	3	1.108	0.480	0.656	1.792	1.855
0.675	3	1.111	0.476	0.648	1.793	1.855
0.680	3	1.113	0.473	0.639	1.794	1.855
0.685	3	1.116	0.469	0.630	1.794	1.855
0.690	3	1.118	0.466	0.621	1.795	1.855
0.695	3	1.120	0.463	0.612	1.796	1.855
0.700	3	1.123	0.460	0.603	1.797	1.854
0.705	3	1.125	0.457	0.594	1.797	1.854
0.710	3	1.127	0.454	0.585	1.798	1.854
0.715	3	1.129	0.450	0.576	1.798	1.854
0.720	3	1.132	0.447	0.567	1.799	1.854
0.725	3	1.134	0.444	0.558	1.799	1.853
0.730	3	1.136	0.442	0.549	1.800	1.853
0.735	3	1.138	0.439	0.540	1.800	1.853
0.740	3	1.140	0.436	0.531	1.801	1.853
0.745	3	1.143	0.433	0.522	1.801	1.852
0.750	3	1.145	0.430	0.513	1.801	1.852
0.755	3	1.147	0.427	0.504	1.802	1.852
0.760	3	1.149	0.425	0.495	1.802	1.851
0.765	3	1.151	0.422	0.486	1.802	1.851
0.770	3	1.153	0.419	0.477	1.803	1.851

Tabla 9. Muestra de datos de archivo TRAYEC.DAT generado por el programa GOTASP.BAS, (Continuación)

PRESION = 10		ANGULO DE TRAYEC. = 11			CD = .97	
TIEMPO	COEF. A.	DIST. X	VEL. X	DIST. Y	VEL. Y	VEL. ABS.
(seg.)	(adim.)	(m.)	(m/seg.)	(m.)	(m/seg.)	(m/seg.)
0.775	3	1.155	0.417	0.468	1.803	1.851
0.780	3	1.157	0.414	0.459	1.803	1.850
0.785	3	1.159	0.412	0.450	1.804	1.850
0.790	3	1.162	0.409	0.441	1.804	1.850
0.795	3	1.164	0.407	0.432	1.804	1.849
0.800	3	1.166	0.404	0.423	1.804	1.849
0.805	3	1.168	0.402	0.414	1.805	1.849
0.810	3	1.170	0.399	0.404	1.805	1.848
0.815	3	1.172	0.397	0.395	1.805	1.848
0.820	3	1.174	0.394	0.386	1.805	1.848
0.825	3	1.176	0.392	0.377	1.805	1.847
0.830	3	1.178	0.390	0.368	1.805	1.847
0.835	3	1.179	0.388	0.359	1.806	1.847
0.840	3	1.181	0.385	0.350	1.806	1.846
0.845	3	1.183	0.383	0.341	1.806	1.846
0.850	3	1.185	0.381	0.332	1.806	1.846
0.855	3	1.187	0.379	0.323	1.806	1.845
0.860	3	1.189	0.377	0.314	1.806	1.845
0.865	3	1.191	0.375	0.305	1.806	1.845
0.870	3	1.193	0.372	0.296	1.806	1.844
0.875	3	1.195	0.370	0.287	1.807	1.844
0.880	3	1.196	0.368	0.278	1.807	1.844
0.885	3	1.198	0.366	0.269	1.807	1.843
0.890	3	1.200	0.364	0.260	1.807	1.843
0.895	3	1.202	0.362	0.251	1.807	1.843
0.900	3	1.204	0.360	0.242	1.807	1.843
0.905	3	1.206	0.358	0.233	1.807	1.842
0.910	3	1.207	0.357	0.224	1.807	1.842
0.915	3	1.209	0.355	0.215	1.807	1.842
0.920	3	1.211	0.353	0.206	1.807	1.841
0.925	3	1.213	0.351	0.197	1.807	1.841
0.930	3	1.214	0.349	0.188	1.807	1.841
0.935	3	1.216	0.347	0.179	1.807	1.840
0.940	3	1.218	0.345	0.170	1.807	1.840
0.945	3	1.220	0.344	0.161	1.807	1.840
0.950	3	1.221	0.342	0.152	1.808	1.840
0.955	3	1.223	0.340	0.143	1.808	1.839
0.960	3	1.225	0.338	0.133	1.808	1.839
0.965	3	1.226	0.337	0.124	1.808	1.839
0.970	3	1.228	0.335	0.115	1.808	1.838
0.975	3	1.230	0.333	0.106	1.808	1.838
0.980	3	1.231	0.332	0.097	1.808	1.838
0.985	3	1.233	0.330	0.088	1.808	1.838
0.990	3	1.235	0.328	0.079	1.808	1.837
0.995	3	1.236	0.327	0.070	1.808	1.837
1.000	3	1.238	0.325	0.061	1.808	1.837
1.005	3	1.240	0.324	0.052	1.808	1.837
1.010	3	1.241	0.322	0.043	1.808	1.836
1.015	3	1.243	0.321	0.034	1.808	1.836
1.020	3	1.244	0.319	0.025	1.808	1.836
1.025	3	1.246	0.317	0.016	1.808	1.836
1.030	3	1.248	0.316	0.007	1.808	1.835

Tabla 10. Resumen de filmaciones de gotas con la cámara de alta velocidad
datos de diámetro y velocidad absoluta

PRESION	D. DEL ASPER.	N. DE GOTA	DIAM. EQ.	VEL. ABS.
m.c.a.	m.		mm.	(cm/seg.)
10	2	1	1.71	188.42
		2	1.59	182.24
		3	1.38	135.53
		4	2.39	234.19
		5	1.954	210.15
		6	2.111	230.125
		7	1.596	179.23
MEDIA			1.819	194.269
10	5	1	1.38	139.7
		2	2.89	422.28
		3	3.65	479.87
		4	2.11	357.77
		5	1.427	278.55
		7	1.316	140.2
		8	3.272	435.02
MEDIA			2.292	321.913
10	7	1	6.5	699.89
		2	2.83	534.39
		3	2.98	537.54
		4	1.31	456.26
		5	6.045	814
		6	3.44	574.77
		7	9.16	904.72
		8	5.046	610.501
		9	6.924	830.235
MEDIA			4.915	662.478

PRESION	D. DEL ASPER.	N. DE GOTA	DIAM. EQ.	VEL. ABS.
m.c.a.	m.		mm.	(cm/seg.)
15	2	1	2.34	163.88
		2	1.95	157.58
		3	2.25	
		4	1.95	151.26
		5	1.81	145.35
		6	1.42	142.5
		7	2.05	160.31
MEDIA			1.967	153.480
15	5	1	1.596	185.602
		2	1.819	215.72
		3	1.711	203.51
		4	1.711	195.304
		5	2.42	326.111
		6	2.67	329.804
		7	2.573	327.614
MEDIA			2.071	254.809
15	8	1	4.6	508.12
		2	6.5	789.12
		3	6.72	715.48
		4	8.08	
		5	4.96	655.12
		6	5.08	692.67
		7	5.08	693.68
MEDIA			5.860	675.698

Tabla 10. Resumen de filmaciones de gotas con la cámara de alta velocidad
datos de diámetro y velocidad absoluta, (Continuación).

PRESION	D. DEL ASPER.	N. DE GOTA	DIAM. EQ.	VEL. ABS.
m.c.a.	m.		mm.	(cm/seg.)
20	2	1	2.05	167.71
		2	2.326	185.31
		3	6.511	314.72
		4	4.005	242.23
		5	2.141	162.95
		6	2.05	179.53
		7	2.05	182.23
		8	2.764	212.54
MEDIA			2.987	205.903
20	5	1	3.95	383.85
		2	2.43	223.66
		3	2.42	180.43
		4	4.37	450.198
		5	3.49	160.19
		6	7.39	
		7	3.25	154.13
		8	4.005	292.85
		9	3.21	186.66
MEDIA			3.835	253.996
20	8	1	3.49	489.66
		2	7.39	908.97
		3	3.25	484.68
		4	4	696.65
		5	3.25	467.04
		6	3.25	466.66
		7	3.25	532.5
		8	2.59	402
MEDIA			3.809	556.020

Tabla 11. Análisis de energía cinética y reducción de la velocidad de infiltración de gotas de la velocidad de gotas del modelo.

PRESION = 10 m.c.a										
DIST DEL ASPERSOR (m.)	LAM. DE AGUA (mm.)	DIAM. DE GOTA (mm.)	VEL. DE GOTA (m/s)	No. DE GOTAS X cm ²	Ke x GOTA (JOULES)	KE X LP X CM ² (JOULES/cm ²)	LIMO (%)	Sa (%)	R (%)	
1	3.630	0.119	1.623	411403.26	1.16211E-09	0.0005	41	35.4	1.05	
2	2.670	0.372	2.853	9905.68	1.09698E-07	0.0011	41	35.4	4.68	
3	2.540	0.774	3.989	1046.20	1.93161E-06	0.0020	41	35.4	11.81	
4	2.080	1.502	5.087	117.23	2.29563E-05	0.0027	41	35.4	25.30	
5	1.150	3.162	6.390	6.95	3.37952E-04	0.0023	41	35.4	56.21	
6	1.490	2.610	6.503	16.01	1.96842E-04	0.0032	41	35.4	50.42	
7	4.160	4.091	7.667	11.60	1.05368E-03	0.0122	41	35.4	84.49	
8	1.850	6.920	9.140	1.07	7.24734E-03	0.0077	41	35.4	151.26	
PRESION = 15 m.c.a.										
DIST DEL ASPERSOR (m.)	LAM. DE AGUA (mm.)	DIAM. DE GOTA (mm.)	VEL. DE GOTA (m/s)	No. DE GOTAS X cm ²	Ke x GOTA (JOULES)	KE X LP X CM ² (JOULES/cm ²)	LIMO (%)	Sa (%)	R (%)	
1	3.310	0.110	1.550	474954.41	8.37162E-10	0.0004	41	35.4	0.94	
2	1.400	0.313	2.653	8719.61	5.65035E-08	0.0005	41	35.4	3.79	
3	1.200	0.616	3.640	980.49	8.10798E-07	0.0008	41	35.4	8.99	
4	1.120	1.073	4.567	173.15	6.74573E-06	0.0012	41	35.4	17.53	
5	1.100	1.772	5.516	37.76	4.43208E-05	0.0017	41	35.4	31.40	
6	1.310	1.786	5.677	43.92	4.80673E-05	0.0021	41	35.4	32.74	
7	2.160	2.492	6.481	26.66	1.70175E-04	0.0045	41	35.4	48.64	
8	3.780	3.441	7.377	17.72	5.80472E-04	0.0103	41	35.4	71.48	
8.5	3.860	4.033	7.858	11.24	1.06042E-03	0.0119	41	35.4	86.33	
9	1.740	4.760	8.415	3.08	1.99939E-03	0.0062	41	35.4	105.46	
PRESION = 20 m.c.a										
DIST DEL ASPERSOR (m.)	AM DE AGU (mm.)	IAM DE GOT (mm.)	EL. DE GOT (m/s)	No. DE GOTA X cm ²	Ke x GOTA (JOULES)	EX LP X CM ² (JOULES/cm ²)	LIMO (%)	Sa (%)	R (%)	
1	3.910	0.103	1.510	683387.56	6.52279E-10	0.0004	41	35.4	0.87	
2	2.140	0.287	2.539	17289.01	3.98969E-08	0.0007	41	35.4	3.38	
3	1.860	0.543	3.447	2218.79	4.98024E-07	0.0011	41	35.4	7.70	
4	1.660	0.896	4.274	440.74	3.44002E-06	0.0015	41	35.4	14.25	
5	1.680	1.860	5.068	49.86	4.32693E-05	0.0022	41	35.4	29.14	
6	1.590	1.445	5.286	100.65	2.20712E-05	0.0022	41	35.4	25.87	
7	2.048	1.962	5.929	51.79	6.95069E-05	0.0036	41	35.4	36.89	
8	2.330	2.575	6.628	26.06	1.96365E-04	0.0051	41	35.4	51.18	
8.5	2.690	2.924	6.979	20.55	3.18777E-04	0.0066	41	35.4	59.60	
9	3.050	3.332	7.368	15.75	5.25754E-04	0.0083	41	35.4	69.82	
9.5	2.510	3.817	7.816	8.62	8.89413E-04	0.0077	41	35.4	82.58	

R = Reducción de la vel. de inf. en %. Ke = Energía cinética, LP = Lámina precipitada

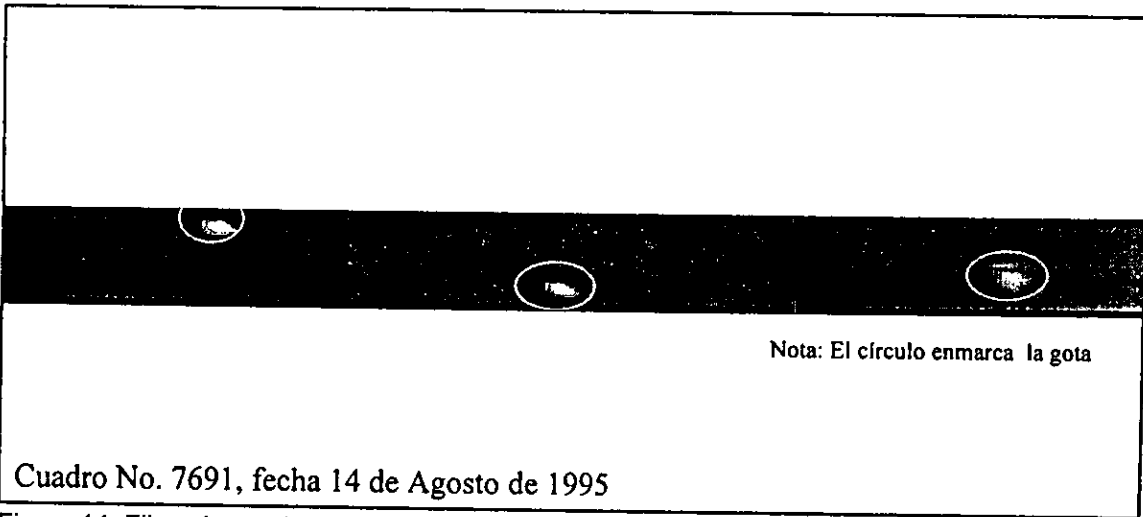


Figura 14. Filmaciones de gotas de archivos digitalizados a una presión de 10 m.c.a. y a 5 m. del origen de aspersión.

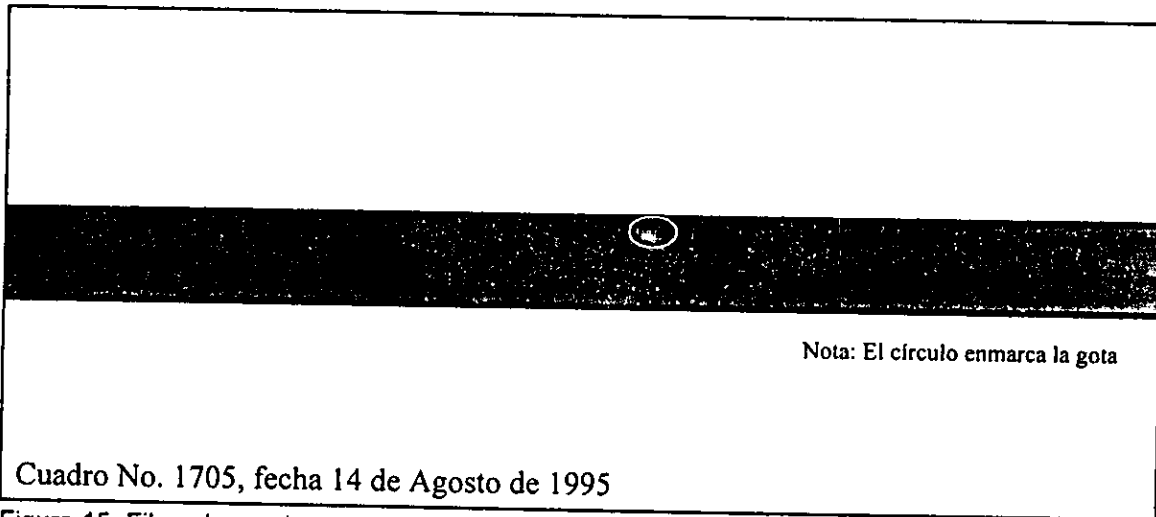


Figura 15. Filmaciones de gotas de archivos dogitalizados a una presión de 10 m.c.a. y a 5 m. del origen de aspersión.

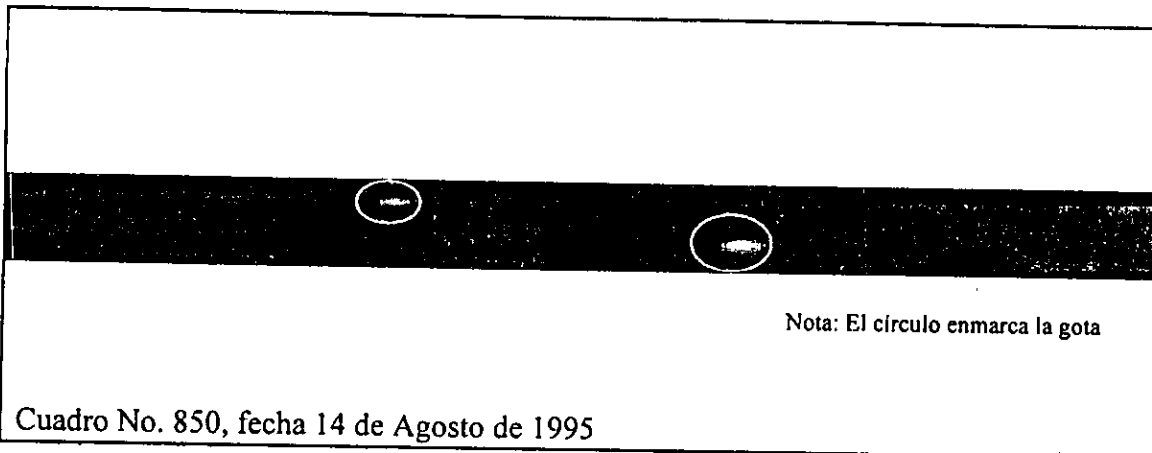


Figura 16. Filmaciones de gotas de archivos digitalizados a una presión de 10 m.c.a. y a 7 m. del origen de aspersión.

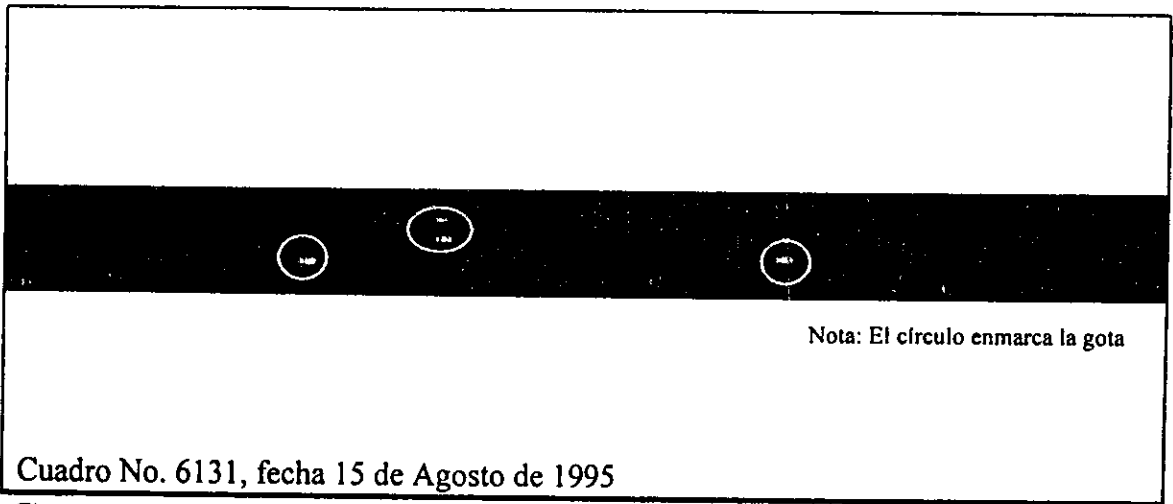


Figura 17. Filmaciones de gotas de archivos digitalizados a una presión de 20 m.c.a. y a 2 m. del origen de aspersión.

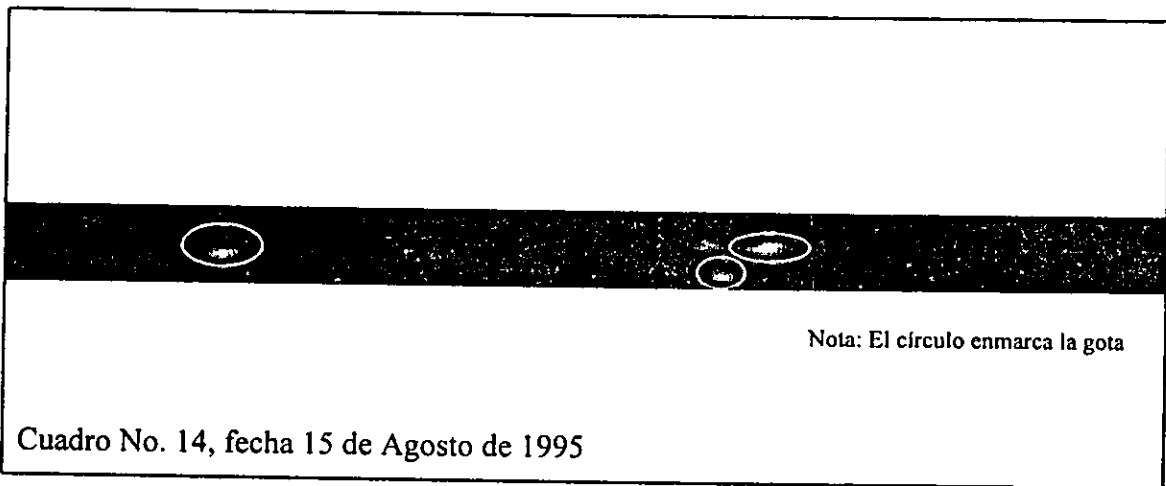


Figura 18. Filmaciones de gotas de archivos digitalizados a una presión de 20 m.c.a. y a 5 m. del origen de aspersión.

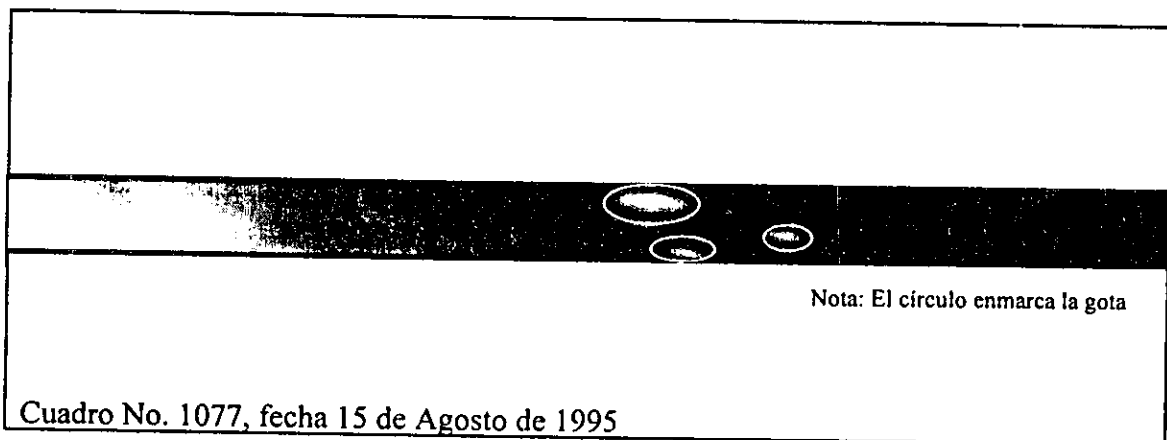


Figura 19. Filmaciones de gotas de archivos digitalizados a una presión de 20 m.c.a. y a 8 m. del origen de aspersión.