

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE AGRONOMÍA

Memoria de Título

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DOSIFICADOR PARA
PULVERIZADORAS.**

Patrick Alexis Guerra Estay

**Santiago, Chile
2007**

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE AGRONOMÍA

Memoria de Título

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DOSIFICADOR PARA
PULVERIZADORAS.**

DESIGN AND EVALUATION OF A SYSTEM TITRATION FOR SPRAYERS.

Patrick Alexis Guerra Estay

**Santiago, Chile
2007**

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

Título

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DOSIFICADOR PARA
PULVERIZADORAS**

Memoria para optar al título profesional de:
Ingeniero Agrónomo
Mención: Fruticultura

Patrick Alexis Guerra Estay

	Calificaciones
Profesor Guía	
Sr. Ian Homer B. Ingeniero Agrónomo Dr.	6,9
Profesores Evaluadores	
Sr. Julio Haberland A. Ingeniero Agrónomo Ph.D.	6,0
Sr. Walter Luzio L. Ingeniero Agrónomo. M.S.	6,5

Santiago, Chile
2007

A mis Padres

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
“ABSTRACT”	2
INTRODUCCIÓN.....	3
MATERIALES Y MÉTODOS.....	5
Lugar de estudio.....	5
Materiales.....	5
Metodología.....	5
Recopilación de variables para el diseño.....	7
Elaboración de prototipo base.....	8
Regulación del caudal a inyectar.....	8
Sistema de inyección.....	9
Diseño definitivo.....	9
Análisis estadístico.....	9
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	10
Variables que determinaron el diseño.....	10
Forma de impulsión.....	10
Dosificación de los productos agroquímicos.....	10
Caudal de inyección	11
Elaboración de prototipo base.....	12
Panel de control neumático.....	13
Estanque de productos agroquímicos (EPA), utilizado en prototipo.....	14
Regulación del caudal a inyectar.....	15
Regulación por sección constante a presión variable.....	15
Perforación calibrada.....	15
Posiciones de un regulador de caudal.....	16
Regulación por combinación de secciones constantes.....	17
Regulación por sección variable a presión constante.....	19

Regulación por sección y presión variables.....	22
Selección de un sistema regulador de caudal.....	22
Pruebas al sistema regulador seleccionado.....	23
Sistema de inyección.....	24
Pruebas de inyección.....	25
Diseño definitivo.....	28
Estanque de almacenamiento de aire comprimido.....	29
Capacidad.....	29
Estanque de productos agroquímicos (EPA).....	29
Panel de control neumático.....	30
Funcionamiento del sistema dosificador.....	30
Llenado con agroquímico el EPA.....	30
Calibración de la dosificación.....	30
Recuperación del agroquímico.....	30
Lavado del sistema.....	30
CONCLUSIONES.....	32
BIBLIOGRAFÍA.....	33
APÉNDICES.....	34

RESUMEN

La aplicación de agroquímicos en la actualidad tiene importancia, tanto del punto de vista económico como medio ambiental. Los equipos utilizados actualmente trabajan con grandes estanques, en los cuales el producto a aplicar se encuentra mayormente en una solución, lo que implica un riesgo y causa problemas para la eliminación de residuos de agroquímicos.

No existen actualmente muchas variantes al sistema tradicional de dosificación, por lo cuál en la presente memoria se diseñó y evaluó un prototipo que permite la dosificación del producto comercial directamente, a la red hidráulica permitiendo, entre otros, variar la dosis durante la aplicación y recuperar el agroquímico sobrante, buscando maximizar el uso de los recursos.

El principal criterio de diseño fue minimizar el contacto del agroquímico con partes móviles, ya que estos son altamente corrosivos, por lo tanto el diseño obtenido utiliza energía neumática como impulsor del fluido. Para regular el caudal, se analizaron cuatro formas según las combinaciones posibles de presión de aire y sección de salida del dosificador, siendo estas combinaciones: sección constante y presión variable; sección variable y presión constante, sección variable y presión variable y combinación de secciones constantes. Se eligió el sistema de regulación por sección variable y presión constante debido a su fácil regulación y a su menor gasto de energía, comparado con los otros métodos, las otras formas de regulación del caudal de inyección (variación de dosis) son totalmente factibles con un mayor desarrollo. Además se obtuvo un sistema económico y práctico de medición de caudal para cualquier tipo de fluido (líquido).

La relación de cambios de presión y sección, permite mediante un algoritmo matemático predecir el caudal a aplicar, presentando en casi todos los ensayos un caudal entregado no mayor a un 5 % de variación del esperado. A su vez, el caudal en el tiempo, se encuentra entre los márgenes esperados tanto en la evaluación de dosificación como en la de inyección.

El diseño obtenido permite variar la dosis durante la aplicación, recuperar el exceso de producto, ser montado en pulverizadoras hidráulicas con cualquier ancho de aplicación y mediante el reemplazo de los elementos manuales por electrónicos permitiría realizar un trabajo dentro del concepto de agricultura de precisión.

Palabras claves

Regulación de caudal, inyección, agricultura de precisión.

ABSTRACT

The use of agrochemicals today is important, as much from an economical view point, as from an environmental one. Equipment used today works with large tanks, where the product to be applied is found largely in a solution, which implies a risk, and causes problems in eliminating agrochemical residues.

There are not many variants today to the traditional system of dosification, which is why the present thesis designs and evaluates a prototype that allows dosification of the commercial product directly into the hydraulic system, thus allowing, among other things, to vary the dosage during application and recover the agrochemical left over, so as to maximise the use of resources.

The principal criterion of design was to minimise contact of the agrochemical with moving parts, since these are highly corrosive, therefore the design obtained uses pneumatic energy as an impeller of the fluid. To regulate the flow, four means were analyzed, according to the possible combinations of air pressure and outlet diameters of the dosifier, these combinations being variable pressure and fixed opening; fixed pressure and variable opening, variable pressure and variable opening combination of fixed sections and fixed pressure. The system of regulation per variable section was chosen, due to its easy regulation, and its lesser energy consumption. Compared to other methods, other forms of regulation of the injection flow are totally feasible, with further development. Furthermore an economical and practical system was obtained to measure the flow of any type of fluid (liquid).

The relation of changes of pressure and outlet diameter allows by means of a mathematical algorithm, predicting the flow to apply, producing in practically all tests, a flow no greater than 5 % of the expected variation. Likewise, the flow over time, is found to be within the expected margins, both in the evaluation of dosage and in the injection.

The design obtained allows varying the dosage during application, recovering the excess product, installing on a sprayer with any width of application, and by means of replacing manual elements by electronic, allowing working within the concept of precision agriculture.

Key Words

Flow regulation, injection, precision agriculture.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen numerosos sistemas de aplicación de productos fitosanitarios como: pulverizadores hidráulicos, neumáticos, hidráulicos con inyección de aire, centrífugos, termoneumáticos y con asistencia electrostática. Todos ellos buscan una mayor eficiencia en el uso de los recursos productivos, como también un bajo impacto ambiental (Villa, 1997; Vázquez, 2004). Los diseños de los sistemas de aplicación nombrados, apuntan a ser eficientes tanto en la generación de las gotas del producto como en su transporte, pero también es importante la forma de dosificar los productos y el factor humano involucrado en la operación.

Por esto, la mecanización en si sola, no asegura el éxito de una faena, ésta debe estar acompañada del buen uso y mantención de los equipos; de una adecuada gestión administrativa y del uso de un paquete tecnológico adecuado (Hetz *et al.*, 1978).

Convencionalmente, un operario para preparar la aplicación realiza una mezcla previa del producto químico, posteriormente lo introduce en el estanque y calibra el caudal a dosificar, además regula la dosis del producto modificando la velocidad de aplicación. Esto conlleva problemas como una posible contaminación del operario por contacto directo con el ingrediente activo, además al disminuir la velocidad, aumenta la dosis pero disminuye la eficiencia, por el escurrimiento que ocurre.

Otro inconveniente es que quede un remanente de producto mezclado, debido a un mal cálculo por parte del operario o por no haber realizado el trabajo como se había planificado (Vázquez, 2004). Esto conlleva a eliminar o realizar repasos con los remanentes, lo que constituye una pérdida de producto y una sobre aplicación. Una forma de conseguir una mayor eficiencia y control de las aplicaciones sería, inyectar el producto antes de las boquillas de aplicación. Esto permitiría un ahorro de producto, ya que se podría inyectar sólo lo necesario, y en caso de quedar remanentes, poder recuperar el producto al no estar éste disuelto en el estanque de la pulverizadora.

Los sistemas de inyección se dividen: en los que operan utilizando energía cinética de un fluido, que obra como elemento motor, y los que inyectan fluido con un sistema presurizado (Faisandier, 1965). En el primer sistema de inyección está el Venturi (hidroinyector) utilizado para el llenado del estanque de la máquina de aplicación Vázquez (2004), en sistemas de dosificación de combustibles y en sistemas de fertirrigación entre otros. Este sistema tiene la ventaja de no tener piezas móviles, pero tiene la desventaja de tener una respuesta lenta ante un cambio en la velocidad del fluido, lo que generaría una mezcla más pobre, perjudicando la precisión de la máquina, además genera una considerable pérdida de carga en el circuito hidráulico donde se encuentre instalado. El otro sistema utiliza por lo general una bomba, la que presuriza el líquido a inyectar. Existe una gran variedad de bombas: pistón, pistón – membrana, membrana, rodillos, centrífugas y las de engranajes. La desventaja de estas bombas es que cuentan con piezas móviles

susceptibles al desgaste y deben resistir la acción corrosiva del ingrediente activo. Además, las bombas de pistón, membrana y pistón – membrana, generan un pulso en la inyección lo que provocaría una dosificación desuniforme, (Faisandier, 1965; Mataix, 1982; Vázquez, 2004).

La dosis de los agroquímicos depende de varios factores; por ejemplo, en el caso de herbicida, textura del suelo, tipo de maleza, estado de desarrollo y densidad, que requieren de una mayor dosis cuanto mayor sean estos componentes (Kogan, 1992). En el caso de fertilizantes foliares, del estado nutricional del cultivo. Por lo tanto, el sistema de dosificación de producto podría ser una herramienta para la agricultura de precisión, además de bajar los costos, ya que se aplicaría producto según las condiciones particulares y no generalizando la dosis como se realiza comúnmente.

Las ventajas de una pulverizadora con un sistema dosificador de agroquímicos: no es necesario preparar caldo lo que permite un ahorro de tiempo y mayor seguridad para el operario, máximo aprovechamiento del producto, el sobrante puede ser utilizado nuevamente, los equipos electrónicos permitirían adecuar la dosis durante el tratamiento al estado del problema que se combate (Vázquez, 2004). Además de las ventajas señaladas anteriormente, se puede agregar un ahorro en la fabricación de la máquina; como la bomba solo estaría en contacto con agua, su fabricación sería más económica que las máquinas comunes, que deben ser fabricadas con materiales que soporten la corrosión de los ingredientes activos de los plaguicidas, (Faisandier, 1965; Villa, 1997; Vázquez, 2004).

Por lo tanto, el objetivo general de la presente memoria es:

- Diseñar y evaluar un sistema dosificador de agroquímicos líquidos para pulverizadoras hidráulicas (SDAP).

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar del estudio

Esta investigación se llevó a cabo el primer semestre del año 2006 en el Laboratorio de Mecanización Agrícola del Departamento de Ingeniería y Suelos, perteneciente a la Facultad de Ciencias Agronómicas de La Universidad de Chile, Comuna de La Pintana, Región Metropolitana.

Materiales

Para la evaluación del sistema dosificador se construyó un prototipo base, que estaba constituido por un sistema impulsor neumático, para esto se utilizó un compresor de pistones marca Weaver, un estanque del producto agroquímico (EPA), un panel de control neumático formado por un regulador de presión de aire marca Festo, modelo LRD – mini, manómetro para medir presiones marca Festo y un medidor de caudal de aire marca Key Instruments modelo MR 3000; un regulador de caudal de inyección, donde se evaluó un regulador de caudal, marca Albinea RE y perforaciones calibradas. Para evaluar la dosificación y determinar el caudal se utilizó una balanza digital.

La evaluación de la inyección se realizó a través de un banco de prueba marca Ludmark Ltd., el cuál ésta constituido por manómetros, una bomba de engranajes movida por un motor eléctrico, el cuál simuló el circuito hidráulico de la pulverizadora (CHP) y además permitió medir presiones y caudales.

Metodología

La presente memoria se desarrollo en etapas consecutivas mostradas en la Figura 2 donde se aprecia a través de un diagrama de flujo los pasos seguidos para la obtención del sistema dosificador de agroquímicos para pulverizadoras (SDAP). Además se detalla la metodología empleada para cada etapa.

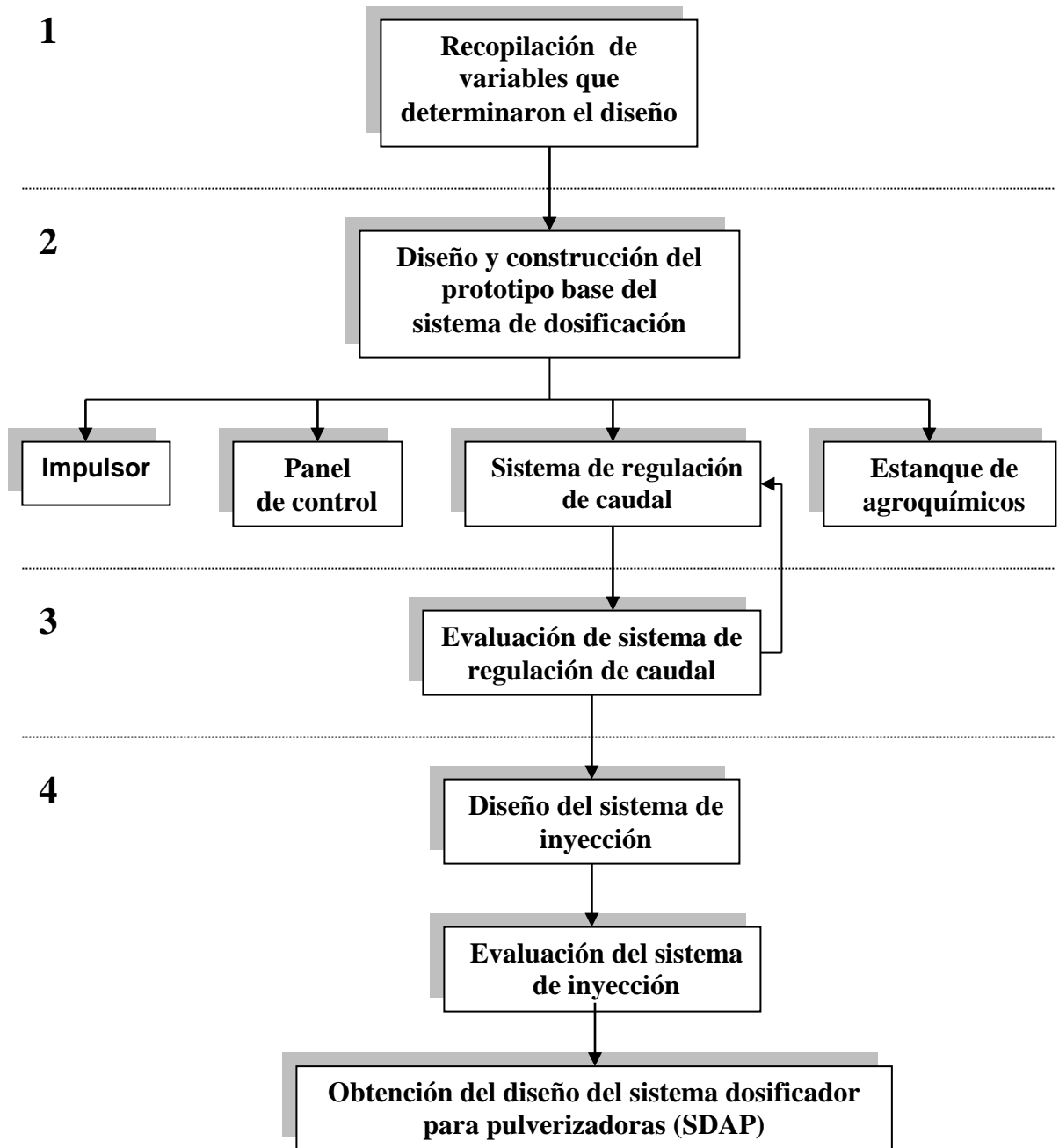


Figura 2. Diagrama de flujo para la obtención del diseño del SDAP.

Recopilación de variables para el diseño

En la primera etapa, el diseño del dosificador, se realizó determinando la capacidad y dimensiones en función de las dosis de los productos a aplicar. Para ello, se revisaron las distintas dosis recomendados por los distintos fabricantes de agroquímicos (herbicidas), para determinar las dosis mínimas a máximas a inyectar. Además se determinó de que factores depende la dosificación.

El prototipo se desarrollo sobre la base de una pulverizadora hidráulica integral de 800 L de capacidad, con una barra de aplicación horizontal de 12 m de ancho, con boquillas cada 0,5 m. Esto fue tanto para el diseño como para la evaluación. Para calcular el caudal de inyección se utilizó la ecuación 1.

$$Q_i = \frac{DsAV}{600} \quad (1)$$

Q_i = Caudal de inyección ($L \cdot \text{min}^{-1}$)

Ds = Dosis ($L \cdot \text{ha}^{-1}$)

A = Ancho de trabajo (m)

V = Velocidad ($\text{km} \cdot \text{hr}^{-1}$)

600 = Factor de conversión

En la Figura 1 se muestra el esquema general de una pulverizadora y los sistemas a diseñar, dosificador e inyector de agroquímicos líquidos (SDAP).

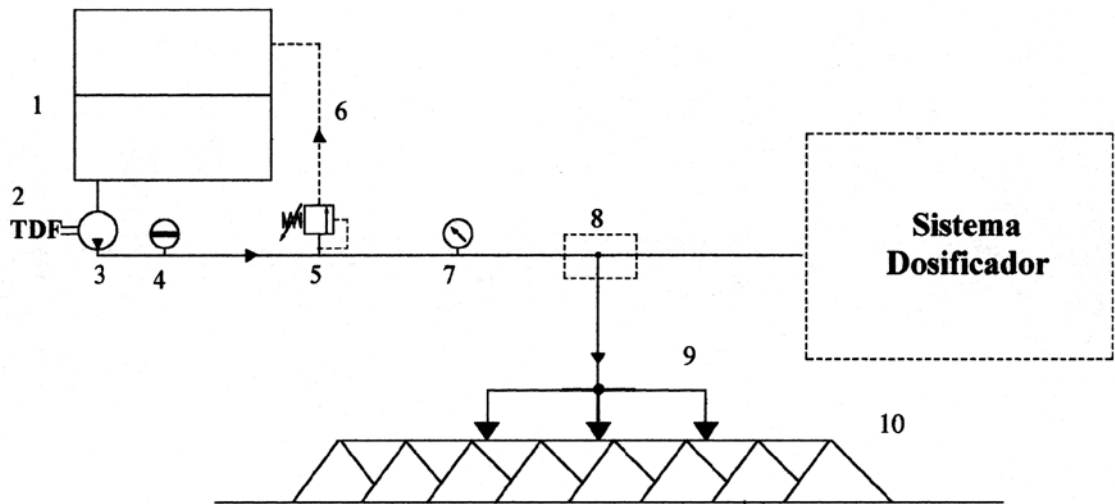


Figura 1. Esquema general, 1) Estanque de agua, 2) Toma de fuerza, 3) Bomba, 4) Acumulador de presión, 5) Regulador de presión, 6) Retorno, 7) Manómetro, 8) Sistema de inyección, 9) Sistema de distribución, 10) Barra pulverizadora.

El Sistema dosificador de agroquímicos líquidos para pulverizadoras (SDAP) para su correcto funcionamiento debe cumplir una serie de características:

- Que dosifique agroquímicos líquidos.
- Sea de una construcción y mantención simple y de bajo costo.
- Que pueda dosificar una amplia gama de dosis
- Las dosis puedan variar durante la aplicación.
- Que pueda ser montada en una pulverizadora convencional.

Estos requerimientos orientaron el proceso de diseño y de evaluación del sistema del prototipo base.

Elaboración de prototipo base

Posteriormente a la recolección de información y definición de las características que debería cumplir el prototipo, se procedió a realizar los diseños y construir un prototipo base para las evaluaciones, del tipo de regulación de caudal, caudal en el tiempo, y del sistema de inyección, todo esto para establecer un diseño definitivo.

Regulación del caudal a inyectar

Se probaron posibles formas y sistemas de regulación de caudal, para determinar los caudales, evaluar los sistemas y determinar el tipo de regulación de caudal más adecuado, según los criterios propuestos se utilizó una balanza digital, pesando el agua recibida durante un minuto. Luego se eligió uno de los sistemas evaluados y se probó su dosificación en el tiempo, se dosificó agua, dosis mínima y máxima, simulando una aplicación en una hectárea (registrando a cada minuto el caudal dosificado). Se considero una velocidad de $5 \text{ km}\cdot\text{hr}^{-1}$ y se utilizó la ecuación 2 para determinar el tiempo de aplicación (inyección); y como parámetro para establecer si un sistema era aceptable, un coeficiente de variación menor o igual a un 5 %.

$$T_i = \frac{600}{A \cdot V} \quad (2)$$

T_i = Tiempo de inyección ($\text{min}\cdot\text{ha}^{-1}$)

A = Ancho de trabajo (m)

V = Velocidad ($\text{km}\cdot\text{hr}^{-1}$)

600 = Factor de conversión

Sistema de inyección

Se diseñó y evaluó un sistema de inyección, inyectando la regulación de caudal del sistema seleccionado al banco de pruebas, que simuló al circuito hidráulico de una pulverizadora (CHP), con él se controló y midió caudal y presiones. Además se probó la inyección en el tiempo, inyectando agua, dosis mínima a máxima, durante un periodo de tiempo que representó a la aplicación para una hectárea. Se utilizó el mismo tiempo que en la prueba del sistema de dosificación de 10 minutos (ecuación 2). Durante éste tiempo se tomó a cada minuto registros con el medidor de caudal de aire comprimido.

Diseño definitivo

Con las evaluaciones anteriores se procedió a realizar un diseño definitivo.

Análisis estadístico

En cada evaluación, se calculó el coeficiente de variación de la tasa de dosificación y el de inyecciones considerando como aceptable cuando una variación era menor o igual al 5 %, además se realizaron regresiones lineales y polinómicas y se determinaron sus respectivos coeficientes de correlación y determinación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables que determinaron el diseño

Para el diseño del sistema dosificador previamente se deben determinar: la forma de impulsión, las variables que determinan la dosificación y las dosis a regular.

Forma de impulsión

Para el desplazamiento de toda masa se necesita un diferencial de energía. Generalmente para generar éste diferencial sobre un líquido se utiliza una bomba, pero como ésta no cumpliría con los objetivos explícitos e implícitos de la presente memoria (partes móviles en contacto agroquímicos, caudal constante, entre otros), se eligió la energía neumática para presurizar el líquido a inyectar, esto debido a sus características que son entre otras: Ser una energía que se puede almacenar y ser transportada, regular su flujo con facilidad, regular los esfuerzos en los elementos de trabajo, controlando la presión del fluido, de una forma simple y de tiempos de respuestas cortos (Serrano, 1999). Además de estas características que cumplen con los criterios de diseño antes mencionados, ésta energía permite tener un sistema de menor costo, ya que utiliza para su generación, un compresor, el cuál no está en contacto con los agroquímicos, además como ésta energía es almacenable, el compresor no funcionaría durante toda la aplicación solo fracciones de ésta, lo que constituye en un menor desgaste, no así una bomba común que debería estar en contacto con el agroquímico y funcionar durante toda la aplicación, lo que constituiría un mayor costo de fabricación y mantención del sistema.

Dosificación del producto agroquímico

En la Figura 3 se muestra gráficamente la ecuación 1 (Apéndice I) donde la dosificación de los agroquímicos es directamente proporcional al caudal de inyección e inversamente proporcional a la velocidad, es decir a mayor velocidad menor será la dosis y a mayor caudal de inyección mayor será la dosis. Por lo tanto se puede regular la dosificación variando la velocidad o/y el caudal de inyección.

Según la literatura se recomienda múltiple dosis de producto comercial, según el tipo de producto, concentración, el problema a controlar o la carencia a suplir. Para la selección del rango a aplicar, se usó como referencia el valor máximo recomendado para herbicidas, por lo tanto se eligió un rango de aplicación de $0-10 \text{ L}\cdot\text{ha}^{-1}$. Esta gama determinó la capacidad del estanque de acumulación de aire comprimido y el del producto de agroquímicos.

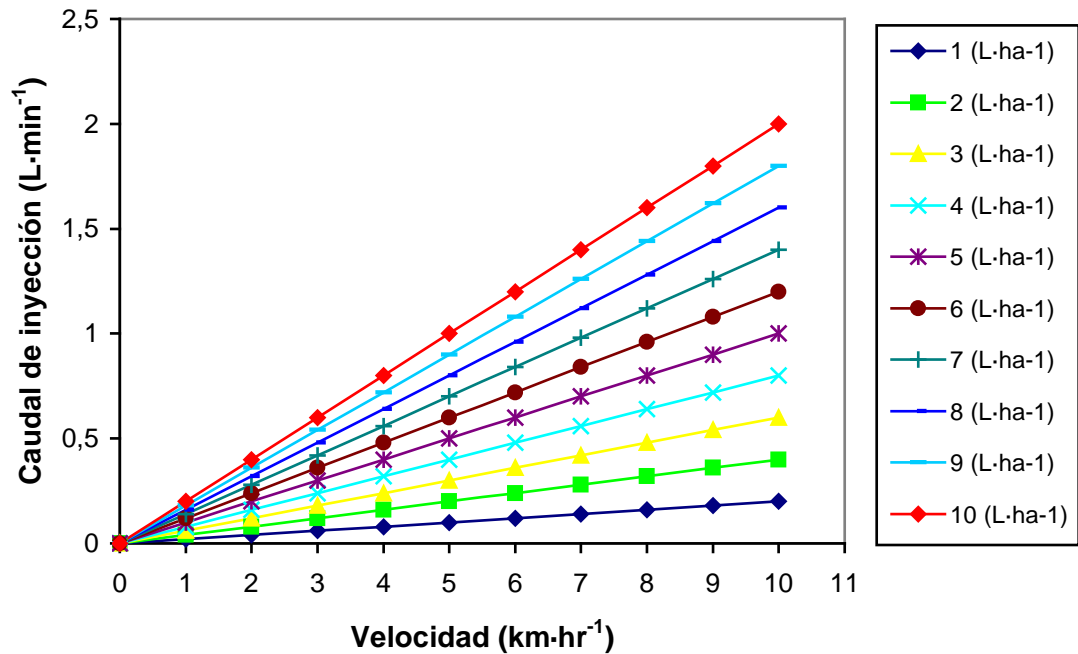


Figura 3. Caudal de inyección de producto agroquímico, en $L \cdot \text{min}^{-1}$, para diferentes dosis y velocidades.

Como se mencionó la dosificación puede ser modificada durante la aplicación por la velocidad de desplazamiento (forma habitual) y por el caudal de inyección del sistema, siendo ésta forma propia del presente diseño, por lo tanto se debe conocer los factores que determinan éste caudal.

Caudal de inyección. Como se puede apreciar en la Figura 3 para aplicar dosis de 1–10 $L \cdot \text{ha}^{-1}$ el equipo debería ser capaz de entregar rangos de 0 a 2 $L \cdot \text{min}^{-1}$. Para cumplir con la amplia variedad de dosis que existen se buscó el método más adecuado para regular la dosificación. Como se muestra en la ecuación 3 el caudal depende de la sección de la tubería y de la velocidad del fluido. Teniendo otras dos formas de regular la dosis.

$$Q = S \cdot V \quad (3)$$

Q = Caudal ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

S = Sección de la tubería (m^2)

V = Velocidad del agroquímico ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Para saber cuáles son las variables que determinarán el caudal inyectado, se utilizó la ecuación de continuidad para obtener la velocidad del fluido a la salida del inyector, ecuación 4.

$$v = \sqrt{2g \left(\frac{p1 - p2}{w} \right)} \quad (4)$$

V = Velocidad del agroquímico ($m \cdot s^{-1}$).

g = Aceleración de gravedad ($m \cdot s^{-2}$).

$P1$ = Presión punto 1 EPA.

$P2$ = Presión punto 2 salida inyector (CHP).

W = Peso específico del fluido ($kg \cdot m^{-3}$).

En la ecuación 4 se aprecia que la velocidad depende, en éste caso de un diferencial de presión entre el estanque del producto agroquímico (EPA) y el circuito hidráulico de la pulverizadora (CHP).

Reemplazando en la ecuación 3 el valor de V de la ecuación 4, se tiene:

$$Q = S \sqrt{2g \left(\frac{p1 - p2}{w} \right)} \quad (5)$$

Por lo tanto el caudal va a depender de la sección de la tubería y de un diferencial de presión entre el EPA y el CHP.

Solamente se puede variar la presión del EPA y no la del CHP, ya que si se realizara ésta operación variaría el tamaño de las gotas a pulverizar, el ángulo y el caudal de aplicación, lo cuál no es recomendable (Villa, 1997; Vázquez, 2004).

Se puede regular el caudal modificando la presión del aire comprimido a la entrada del EPA y regulando la sección a la salida del EPA.

Elaboración de prototipo base

Se diseño y fabricó un prototipo para determinar, cuál es el método (regulación de caudal) que más se ajusta a los requerimientos del sistema dosificador (SDAP) y probar la inyección. En la Figura 4 se muestra el esquema del prototipo, él cuál se dividió en tres partes, Impulsor, para ello se utilizó un compresor de pistones marca Weaver, Panel de control neumático y el Estanque de producto agroquímico, los cuáles se detallan más adelante.

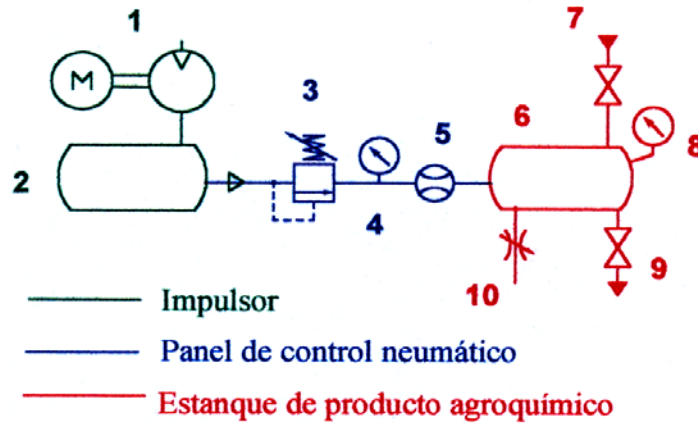


Figura 4. Esquema del prototipo base. 1) Compresor 2) Estanque acumulador de aire comprimido 3) Regulador de presión 4) Manómetro 5) Medidor de caudal 6) Estanque de producto agroquímico 7) Entrada del producto 8) Manómetro 9) Recuperación del producto 10) Salida del producto, punto de evaluación de sistemas de regulación de caudal.

Panel de control neumático

Se construyó un panel de control neumático para regular y medir el caudal de aire comprimido proveniente del acumulador de aire hacia el estanque del producto (EPA).

Como se muestra en la Figura 5, el panel está constituido por un regulador de presión marca Festo modelo LRD - mini, rango de presión 0 – 1,2 MPa, manómetro marca Festo y un medidor de caudal para aire comprimido marca Key Instruments, modelo MR3000, este es solo para mediciones estacionarias, se utilizaría para calibrar el dosificador antes de una aplicación.

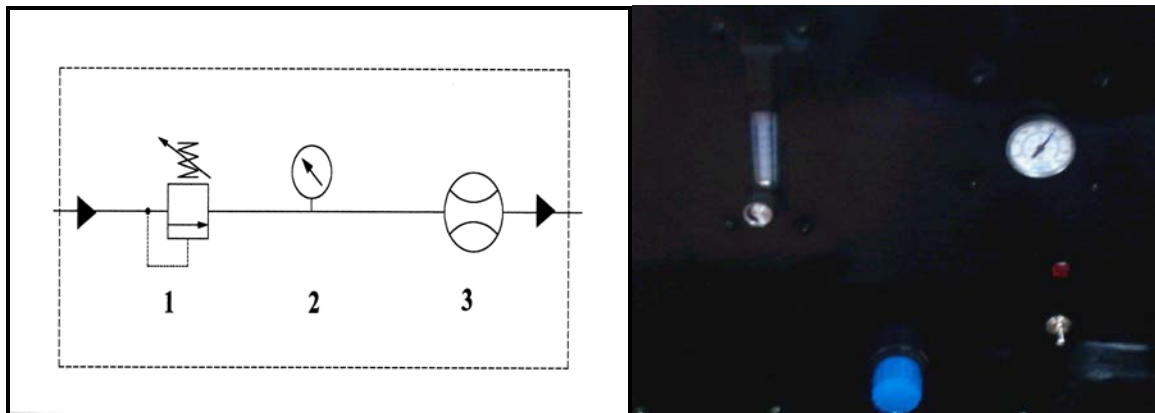


Figura 5. Panel de control neumático, esquema (izquierda) y fotografía del prototipo construido (derecha), 1) Regulador de presión, 2) Manómetro, 3) Medidor de caudal.

Durante las pruebas con el prototipo, al disminuir la presión de operación del sistema ésta quedaba retenida por el medidor de caudal que actuaba como válvula de retención, para solucionar éste problema se tenía que liberar presión por una válvula en el EPA. Una solución al problema sería utilizar un presostato que controle a una electro válvula para liberar presión en el EPA (forma automática).

Estanque de productos agroquímicos (EPA), utilizado en prototipo

Se utilizó como EPA, un estanque acumulador de un sistema de frenos accionado por aire comprimido, de una capacidad de 20 L aproximadamente.

Como se ve en la Figura 6, se instaló un manómetro para verificar la presión de aire comprimido del EPA, lo que permitió ver cuando había una fuga de aire y determinar cuanta presión liberar para bajar presión que quedaba retenida entre el EPA y el medidor de caudal.

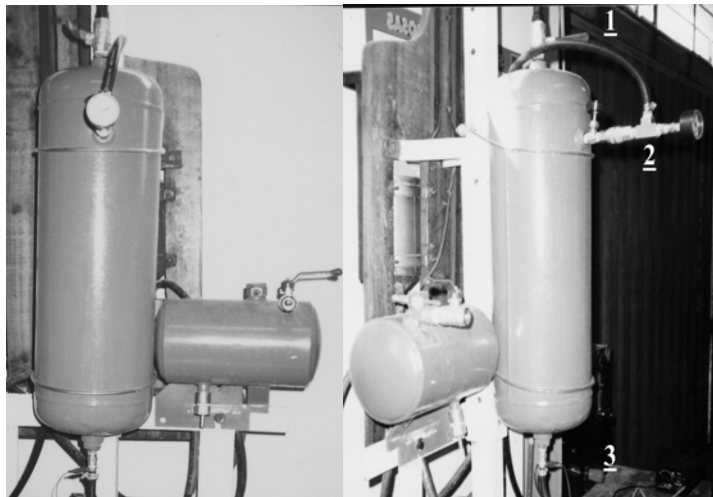


Figura 6. Estanque de producto agroquímico, 1) Entrada del producto 2) Entrada aire comprimido desde el panel neumático y manómetro 3) Salida del agua (producto).

Regulación del caudal a inyectar

Como se analizó anteriormente, la dosificación se puede variar regulando el caudal de inyección de dos formas generales, regulando sección de la salida y la presión de entrada. Con el sistema neumático como impulsor, se obtuvieron cuatro sistemas particulares para regular el caudal de inyección y con ello regular la dosis de aplicación.

Regulación por sección constante a presión variable

Consiste en variar la presión del aire comprimido que ingresa al EPA y mantener constante la sección de salida del agroquímico. Para evaluar ésta forma de regulación se probó con perforaciones calibradas, posiciones de un regulador de caudal y por medio combinaciones de secciones.

Perforación calibrada. En la Figura 7 se muestra el caudal obtenido a diferentes presiones por una perforación de 1mm de diámetro ($0,785 \text{ mm}^2$), (datos Apéndice II), cuatro repeticiones.

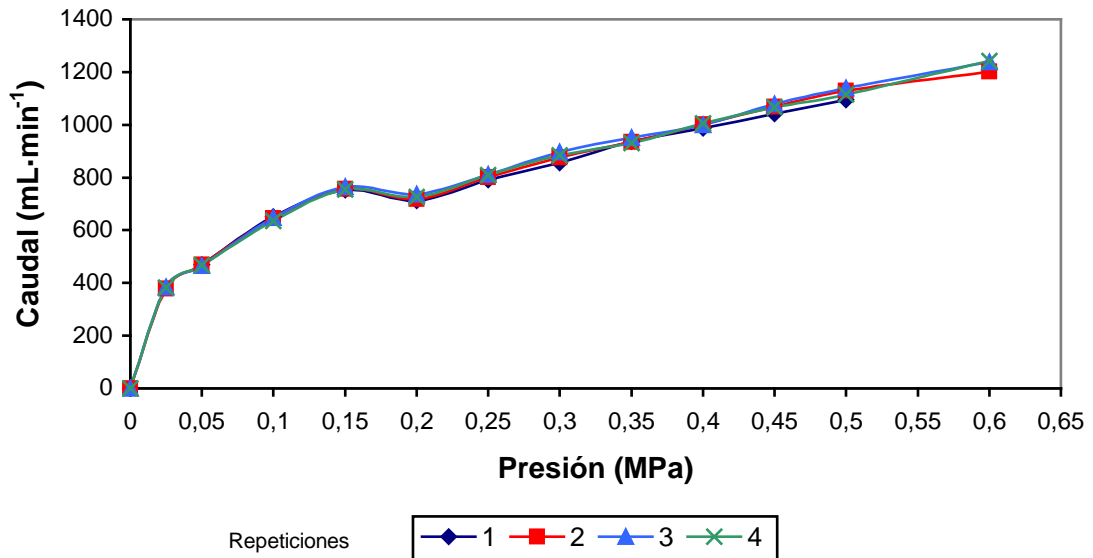


Figura 7. Caudal entregado por perforación de un 1 mm de diámetro, en $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$, cuatro repeticiones a diferentes presiones.

El problema que presentó esta forma de regulación era, que rápidamente se alcanzan caudales altos a bajas presiones (fuerte pendiente en la curva), pero luego el incremento del caudal es bajo con respecto a la presión (menor pendiente de la curva) significando un alto consumo de energía en la aplicación, también se probó con perforaciones de 1,5 y 2 mm de

diámetro obteniendo curvas similares. Además como factor limitante resultó, la lenta regulación de la presión, para que ésta se mantuviera mientras se determinaba el caudal por lo tanto no sería práctico éste método para variar la dosis durante una aplicación.

Posiciones de un regulador de caudal. Se probó con un regulador de caudal marca Albinea, para determinar posición del regulador (apertura) se utilizó un transportador de 360°, como se puede observar en la Figura 8, las posiciones fijas se determinaron cada 90 ° (0° a 720°, Apéndice III), variando la presión de 0 a 0,35 MPa, mostrando en la Figura 9 el efecto que ocurre en diferentes aperturas fijas al variar la presión. El problema es lograr que la presión deseada se mantuviera, lograr el equilibrio entre la presión del EPA y la presión entrante, es lento el mismo problema que se tuvo con sección fija de 1mm de diámetro (0,785 mm²).



Figura 8. Regulador de caudal dividido en diferentes posiciones, grados sexagesimales.

En la Figura 9 la mejor posición fue 720°, evidenciándose por su pendiente, es decir un amplio rango de caudales (caudales de 0 a 1742 mL·min⁻¹), a menores presiones que en la Figura 7, en donde además se logró un menor caudal.

Las dos variantes del sistema de regulación por sección constante a presión variable, presentan el problema que al modificar la presión, es decir establecer una nueva presión era un proceso de prueba y error, por lo tanto no permitiría una regulación exacta durante una aplicación. Este problema se superaría cambiando el regulador de presión por una válvula proporcional reguladora de presión, la cuál ajusta la presión deseada a través de un comando eléctrico, el que realiza modificaciones automáticamente si ocurre un cambio, (Serrano, 1999). Lo que permitiría regular la dosis durante una aplicación y utilizar el sistema dosificador en agricultura de precisión.

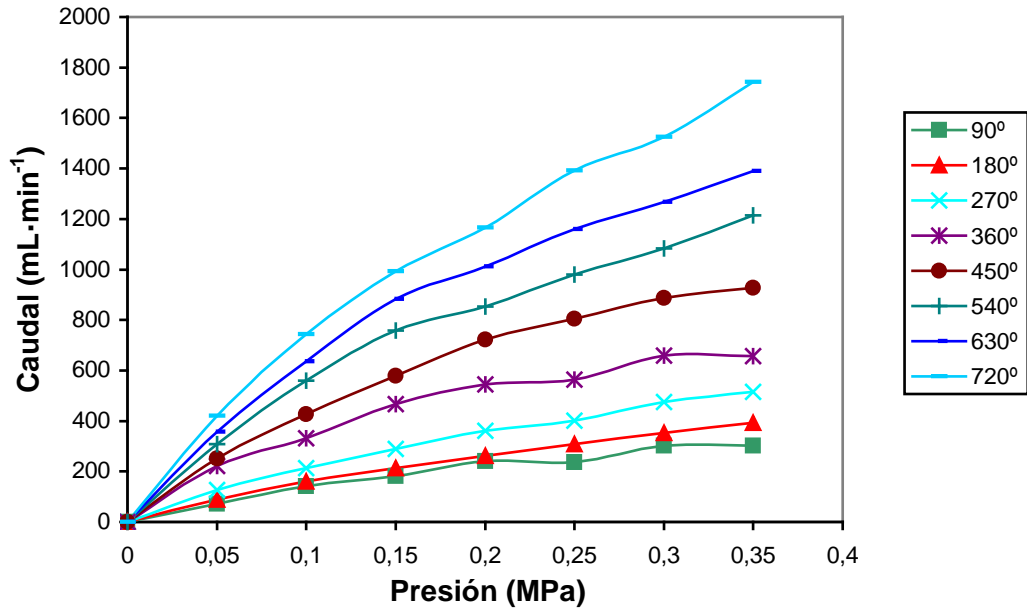


Figura 9. Caudales entregado por un regulador de caudal a diferentes presiones, en mL·min⁻¹, a posiciones fijas de regulador.

Regulación por combinaciones de secciones constantes

Otra forma de regular la dosificación de agroquímicos, solucionando el problema que se vio en la Figura 7, de necesitar altas presiones para alcanzar el total de caudal necesario y lograr una respuesta rápida, sería utilizar una combinación de secciones, que pueden ser fácilmente comandadas por electro válvulas, generando de esa forma una serie de combinaciones de caudales posibles Figura 10.

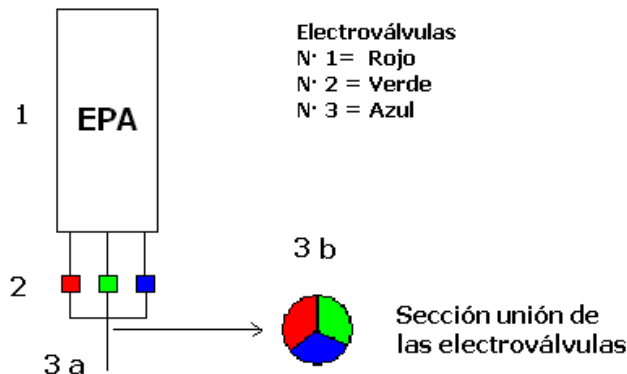


Figura 10. Esquema de disposición de las electro válvulas en el SDAP. 1) Estanque producto agroquímicos 2) Combinación de electro válvulas 3a) Unión y conexión a inyector 3b) detalle de la unión de las tres secciones.

Por ejemplo, utilizando tres secciones diferentes como se muestra en la Figura 10, dispuestas a la salida del estanque de producto agroquímico, permiten 7 combinaciones (7 caudales). En la Figura 11 se muestra las 7 combinaciones si se utilizaran tres secciones seleccionada de la Figura 9, siendo éstas: 1 = 180°, 2 = 270° y 3 = 450°. Con solo tres posiciones se alcanzaron mayores caudales que en la Figura 7 y 9 regulación por sección constante a presión variable, y a menores presiones que en la Figura 7.

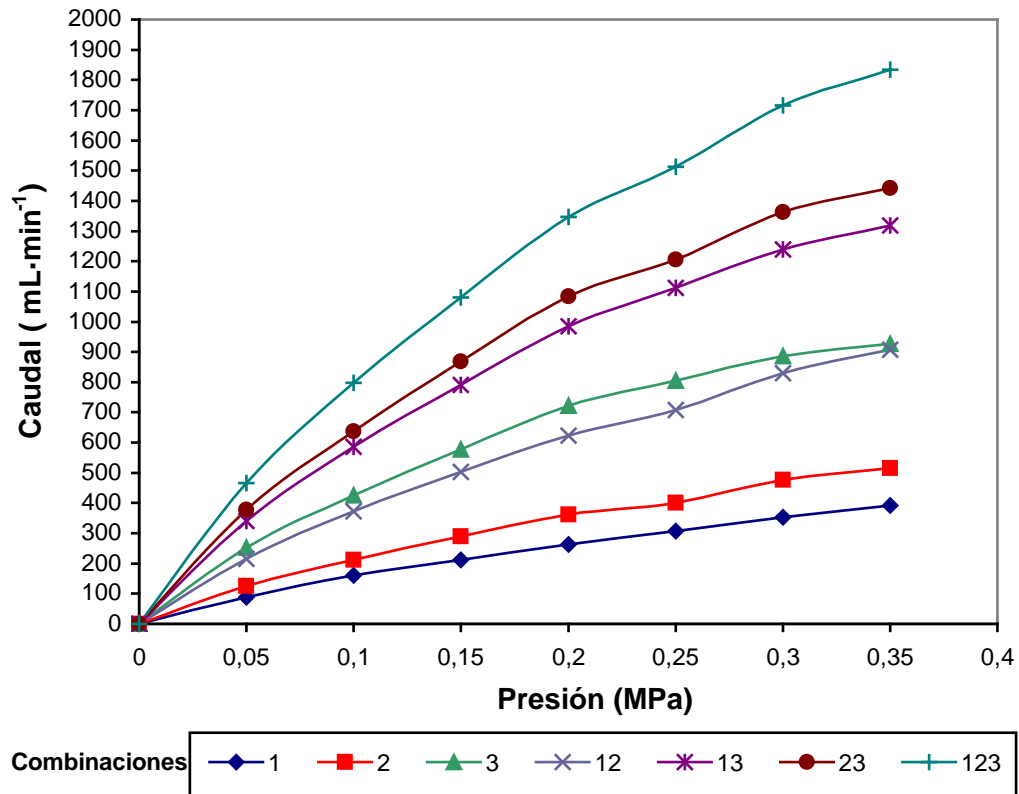


Figura 11. Caudal entregado por siete combinaciones de secciones, en mL·min⁻¹, a diferentes presiones.

La utilización de éste sistema, sería elegir la presión que satisfaga a las diferentes condiciones, que presente el problema a tratar por ejemplo, en la Figura 11 eligiendo la presión de 0,1 MPa se tienen siete caudales de inyección diferentes que combinados con la velocidad de aplicación, como se muestra en la gráfica de la Figura 12 se obtienen múltiples dosis de aplicación.

Una aplicación práctica de éste sistema de dosificación puede ser la variación de la dosis a aplicar por ejemplo un herbicida o de abono foliar según un plano de requerimientos. Por ejemplo en un terreno en donde se necesitan dosis de 1, 2.3 y 4 L·ha⁻¹ según la Figura 12 (Apéndice V) se elegiría una velocidad de 8 km·hr⁻¹ y las combinaciones de secciones serían 1, 1-2, y 2-3 respectivamente.

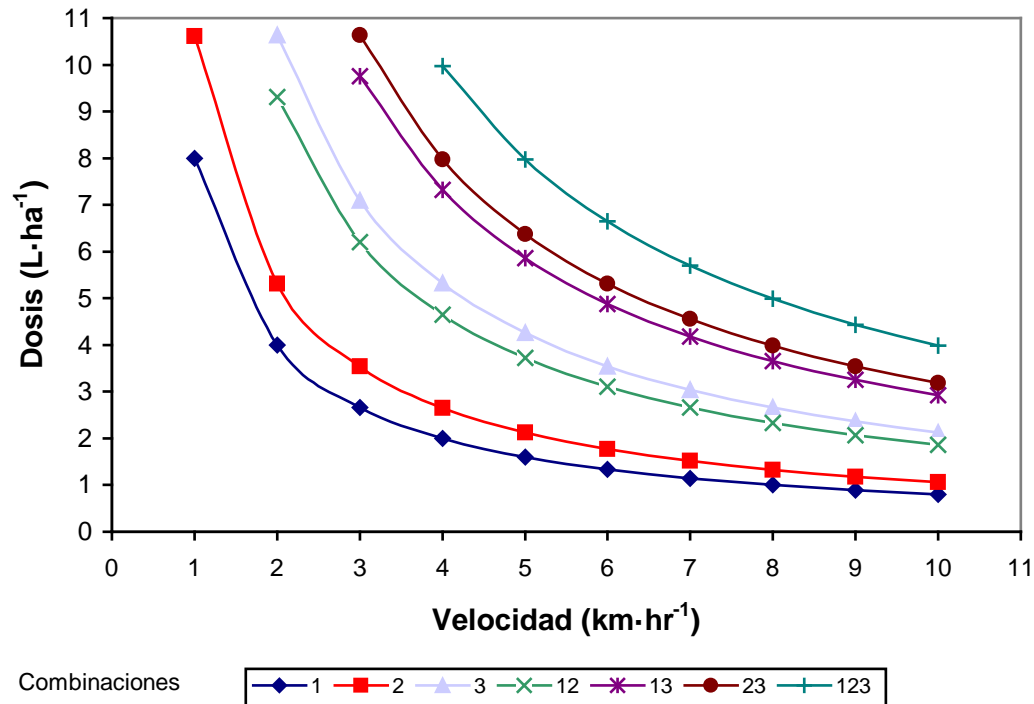


Figura 12. Dosis de aplicación, dadas por combinación de sección y velocidad de aplicación. a 0,1 MPa de presión.

Este sistema tendría el inconveniente de tener elementos mecánicos en contacto con el agroquímico a aplicar (electro válvulas) pero tiene la ventaja de tener una amplia gama de caudales, de fácil calibración y al utilizar electro válvulas pueden ser comandadas por un procesador el cuál puede variar la dosis según las necesidades que se deseen controlar o suplir durante una aplicación.

Regulación por sección variable a presión constante

Como lo dice el nombre, se regula el caudal variando la sección, utilizando para ello un regulador de caudal. El regulador se dividió en grados sexagesimales con un transportador (Figura 8) y las mediciones se tomaron cada 90°.

En la Figura 13, se muestra una gráfica de cómo según la presión de trabajo se puede regular el caudal al variar la sección de la apertura del regulador. Con éste método, como la presión se conservó constante, se obtuvo una regulación del caudal más rápida; por lo tanto, éste tipo de regulación resulta más conveniente para regular en tiempo real (en terreno).

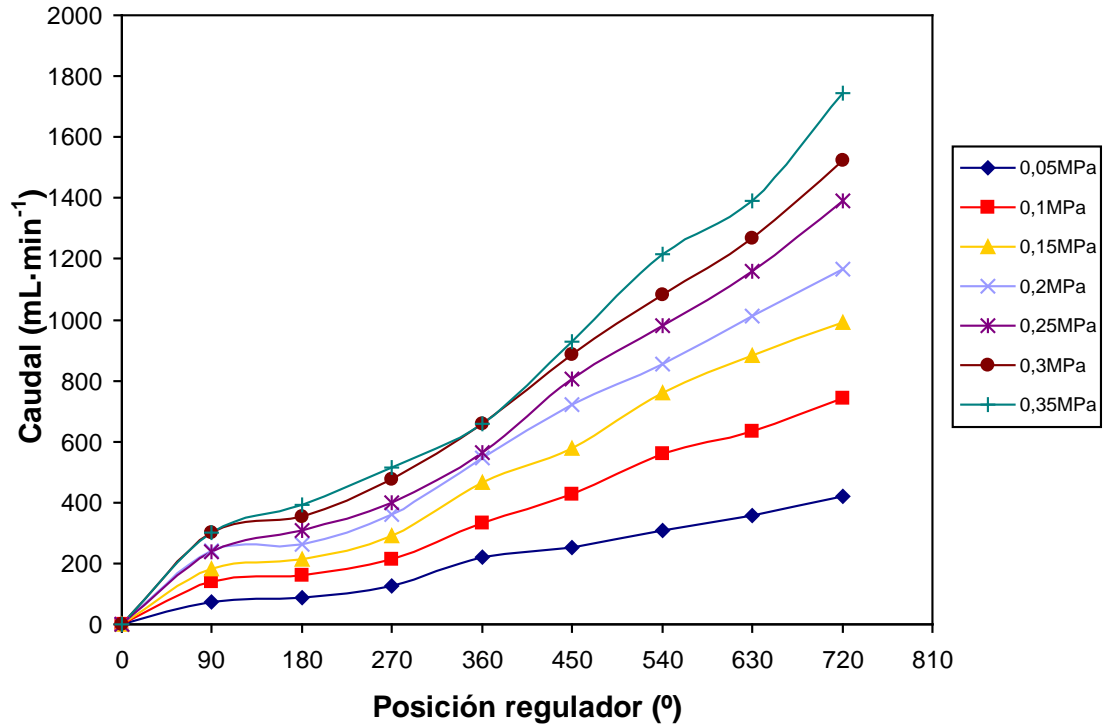


Figura 13. Caudales entregado por diferentes posiciones de un regulador de caudal, en $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, a presión constante.

Para realizar un modelo matemático que permita predecir el caudal conociendo la apertura del regulador (posición). Se eligió a la curva correspondiente a la presión de 0,1 MPa, para cubrir el amplio caudal se utilizó las posiciones de 0° hasta 1260° en intervalos de 90° . Se utilizaron 90 datos para formular el modelo matemático y otros 90 datos para evaluar el modelo.

En la Figura 14 se muestra resultados del modelo, como se ve en la gráfica está dividida por líneas paralelas al eje X, estas líneas dividen en sectores a la curva; la fórmula que aparece dentro del sector de cada división corresponde a la ecuación de regresión y su coeficiente de determinación. Se dividió por sectores debido a que las curvas que forman las repeticiones poseen varios puntos de inflexión y tener una sola curva de regresión que se ajuste perfectamente sería una ecuación polinomial.

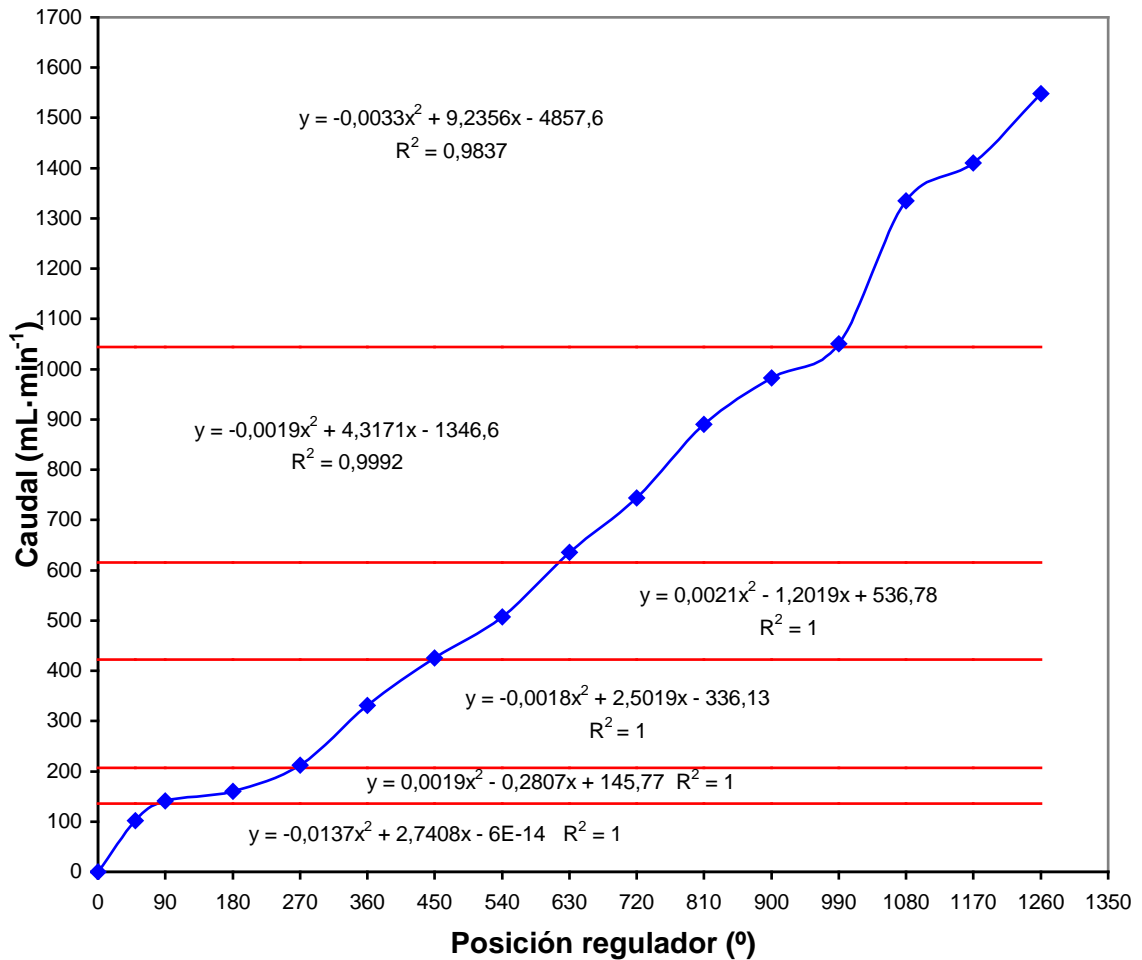


Figura 14. Representación gráfica del modelo logrado, caudal en $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, a diferentes posiciones del regulador de caudal, con una presión de operación de 0,1 MPa.

Para verificar el modelo, se predijo mediante la ecuación de cada sector el caudal a aplicar según la posición del regulador de caudal, y se comparó con los datos realmente obtenidos, como se aprecia en los Apéndice VI y VII el error del modelo y el caudal entregado fue menor a un 5 % en el 92,3 % de los datos y solamente un 7,7 % de los datos fueron mayores o menores a un 5% del caudal esperado. Aunque la cantidad de datos erróneos es alta, de debe hacer mención, que la mitad de los datos utilizados en la creación del modelo fueron realizados con una configuración diferente del equipo lo cual distorsiona los resultados, pero esto solamente es un ejercicio matemático y no el modelo definitivo al cual habría que desarrollar un modelo específico y con mayor cantidad de observaciones.

Este modelo se utilizó en el resto de las evaluaciones, caudal en el tiempo y en las pruebas de inyección.

Regulación por sección y presión variables

Haciendo variable la sección y la presión se obtendría una amplia gama de caudales, con menores posiciones que el sistema sección variable a presión constante, con solamente dos vueltas del regulador de caudal (720°), y presiones de 0 a 0,35 MPa, menores presiones que el sistema de sección constante a presión variable, por lo tanto se tendría un menor gasto de energía y menos posiciones del regulador de caudal, lo que significaría un menor tiempo de respuesta del (SDAP).

En la Figura 15, se muestra los datos de la Figura 8 graficados en tres ejes, obteniendo una ecuación que predice el caudal entregado ante variaciones de la sección como de la presión.

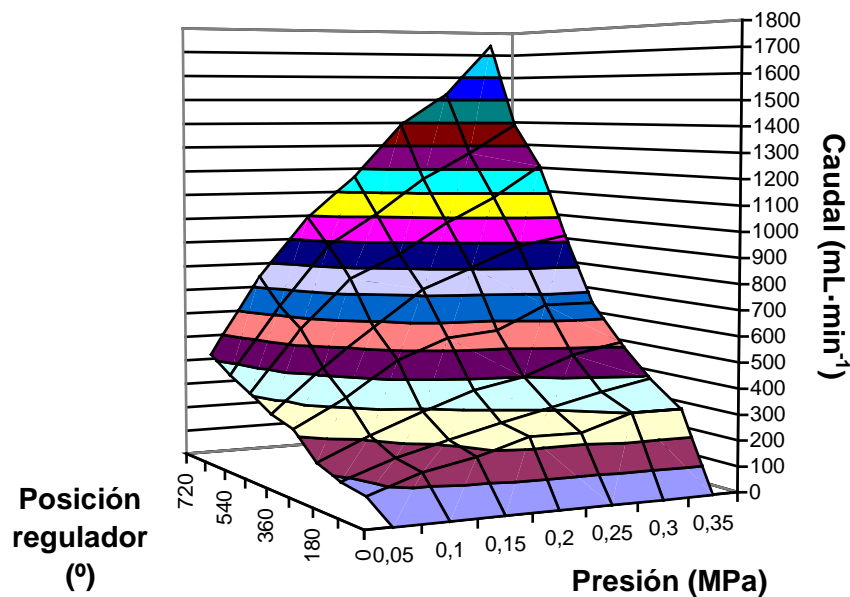


Figura 15. Caudal entregado al variar simultáneamente presión y sección.

El inconveniente de éste sistema es la necesidad de un procesador que comande el regulador de caudal (sección variable) y al regulador de presión (presión variable), para determinar la mejor posición (regulación del caudal de agroquímico y presión de aire) para variar la dosis durante una aplicación.

Selección de un sistema regulador de caudal

Aunque todos los sistemas ensayados tuvieron buenos resultados, como una amplia gama de dosis y caudales constantes, se eligió como mejor sistema dosificador, según las pruebas realizadas y los criterios de diseño planteados antes, al sistema de regulación por sección variable a presión constante, esto debido a que en las pruebas, mostró la ventaja de utilizar

una menor cantidad de energía que el sistema presión variable y además éste sistema resultó práctico para cambiar el caudal de inyección durante una aplicación.

Pruebas al sistema regulador seleccionado

Para las pruebas se consideraron los datos mencionados anteriormente, una pulverizadora de 12 m de ancho, boquillas cada 0,5 m con una velocidad de aplicación de $5 \text{ km}\cdot\text{hr}^{-1}$. Se utilizó la ecuación 2 para calcular el tiempo de inyección (10 minutos por hectárea).

En la Figura 16 y 17 se muestran la dosificación en el tiempo de una dosis baja y alta respectivamente, se eligieron como dosis baja y alta, dosis de $1-10 \text{ L}\cdot\text{ha}^{-1}$, las cuáles corresponde a 100 y $1000 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ respectivamente, para lo cuál en el Apéndice VI se seleccionó 50° de apertura (correspondiente a $102,79 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$) y de 900° (correspondiente $999,79 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$). Se obtuvo una variación menor al 5%, un coeficiente de variación de 0,91 % y 0,93 % respectivamente; por lo tanto la dosificación del producto con el sistema elegido, regulación por sección variable a presión constante cumple con los objetivos propuestos, a pesar de ser solamente un prototipo.

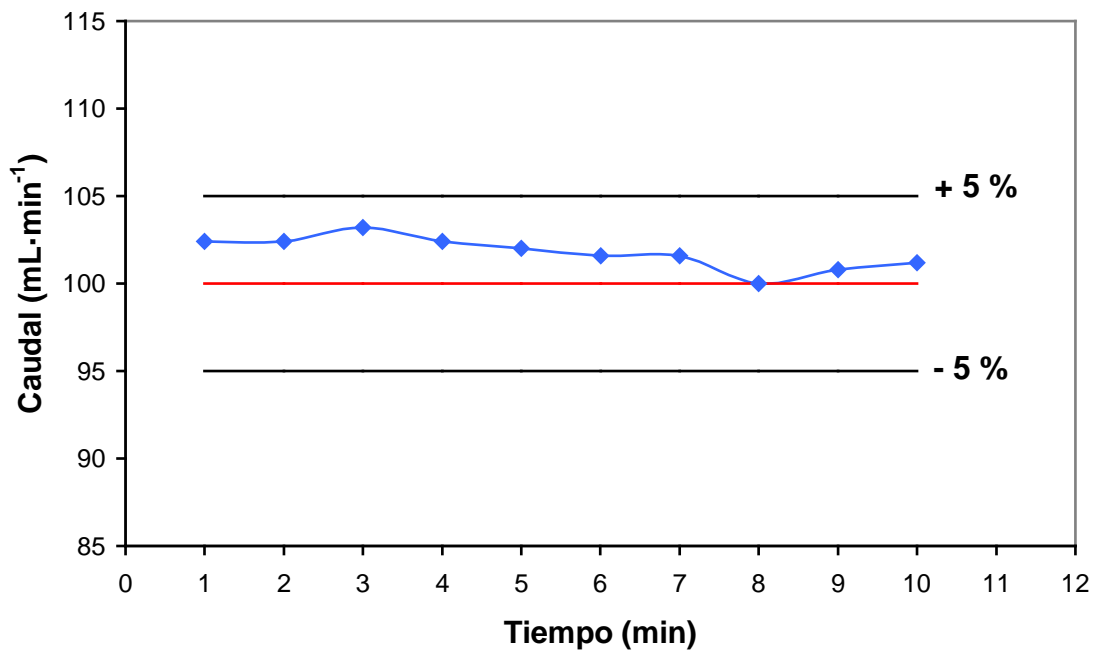


Figura 16. Simulación de aplicación de $1\text{L}\cdot\text{ha}^{-1}$, en $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, durante 10 minutos, respecto al valor esperado y el intervalo de $\pm 5\%$

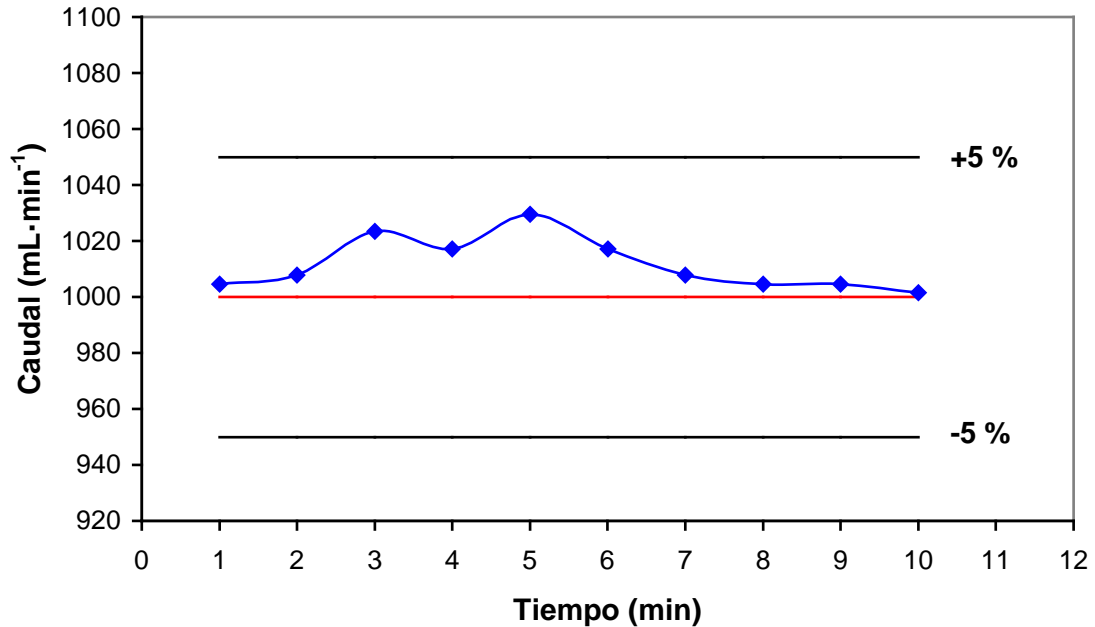


Figura 17. Simulación de aplicación de 10 L·ha⁻¹, en mL·min⁻¹, durante 10 minutos, respecto al valor esperado y el intervalo de $\pm 5\%$

Sistema de inyección

Es el dispositivo encargado de inyectar el agroquímico, al circuito hidráulico de la pulverizadora (CHP). Se diseñó para que inyecte a bajas presiones, y de esa forma utilizar menor energía por volumen inyectado.

Está constituido por dos tubos perpendiculares (punto 4, Figura 20), el tubo de mayor diámetro cumple la función de unir CHP y servir de soporte al tubo de menor diámetro que lo atraviesa perpendicularmente, el tubo de menor diámetro posee un orificio en la mitad de la longitud que atraviesa al tubo (es decir en el radio de éste). Esto es para inyectar en el medio del flujo del agua, así se necesita una menor cantidad de energía, que si se inyectara desde el borde del conducto.

En el tubo que atraviesa al tubo de mayor diámetro ocurre un fenómeno llamado desprendimiento de la capa límite (Figura 18), el flujo en las proximidades del contorno de éste se va continuamente desacelerando a causa de la viscosidad hasta que en un punto la velocidad sería cero. La forma del contorno exigiría aún una disminución mayor de la velocidad, (forma circular); pero como esto es imposible el flujo se desprende del contorno (N° 2 de la Figura 18) al mismo tiempo que se genera un contra flujo producido por el

gradiente de presiones (creando una corriente abajo del tubo, remolinos que originan una depresión N° 3) generando un flujo turbulento. (Mataix, 1982)

Por lo tanto éste simple diseño sirve de inyector y de cámara de turbulencia para la mezcla del producto y el agua.

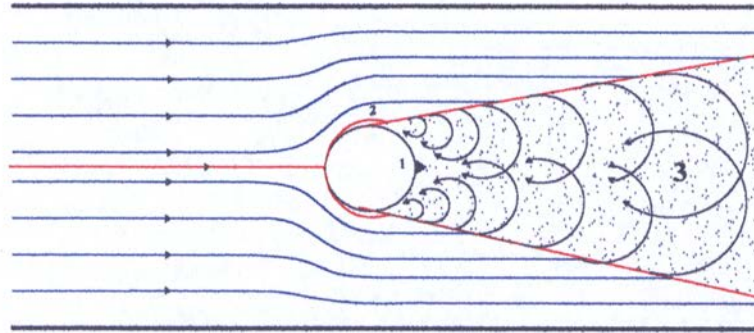


Figura 18. Esquema del inyector. 1) Punto de inyección, 2) zona de desprendimiento, 3) zona de depresión (turbulencia).

Pruebas de Inyección

Debido a que existen una gran cantidad de productos agroquímicos, y cada uno de ellos con propiedades diferentes, no es posible utilizar un medidor de caudal, ya que son fabricados y calibrados para un fluido en particular, sin olvidar que los agroquímicos son corrosivos, por lo tanto utilizar un medidor de caudal directamente resultaría costoso y poco práctico.

Para solucionar éste problema, se planteó la hipótesis de medir el caudal del aire, para conocer el caudal del producto agroquímico dosificado, es decir midiendo el caudal del aire comprimido que entra a EPA, se determinará el caudal inyectado al CHP. Teniendo la ventaja de utilizar solamente un fluido para medir (aire), el medidor de caudal no estaría en contacto con el agroquímico, teniendo una mayor durabilidad por lo tanto una menor mantención.

Para comprobar la hipótesis propuesta se utilizó un medidor de caudal de aire marca Key Instruments, modelo MR3000. Con él cuál se midió el caudal de aire, para evitar errores de lectura, se midió la altura que alcanzaba el indicador del medidor de caudal con un pie de metro, y el caudal de agua (a la salida del regulador de caudal) se determinó mediante una balanza (el mismo método utilizado anteriormente).

Dando como resultado una alta correlación ($R = 0,99989$) En la Figura 19 se muestra los datos graficados mostrando la regresión y el alto coeficiente de determinación que se obtuvo, entre la medición del caudal de agua dosificado y el caudal de aire que entra EPA.

Por lo tanto se puede medir el caudal del aire comprimido y determinar el caudal del agroquímico independiente de su viscosidad.

En el Cuadro 1 se muestran los datos obtenidos del caudal de agua y del aire, el caudal de aire se calculó con la ecuación de la regresión obtenida entre el caudal de agua y la altura del medidor de caudal, por lo tanto midiendo la altura del medidor se conoce el caudal del fluido inyectado. El error entre el caudal de aire y el del agua fue bajo, siendo el mayor 1,77 % de error.

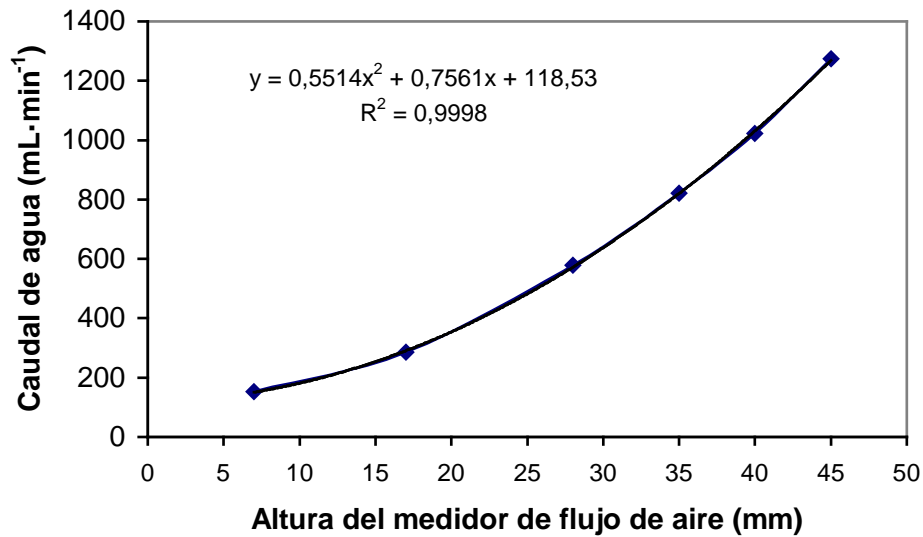


Figura 19. Relación entre caudal de agua con el caudal de aire.

Cuadro 1. Error entre caudal medido y caudal calculado.

Caudal de agua	Caudal aire calculado	Error
mL·min ⁻¹	mL·min ⁻¹	%
152,27	150,84	0,94
285,60	290,74	1,77
579,07	572,00	1,24
821,87	820,46	0,17
1021,87	1031,01	0,89
1273,33	1269,14	0,33

Ya obtenido un método para medir el caudal inyectado y haber construido el inyector como se ve en la Figura 20, se procedió a evaluar la inyección. Como el sistema la inyección se ve afectado por cambios en el circuito hidráulico de la pulverizadora (CHP), se utilizó

como circuito hidráulico un banco de pruebas con una bomba de engranajes (que mantiene presión y caudal constante).

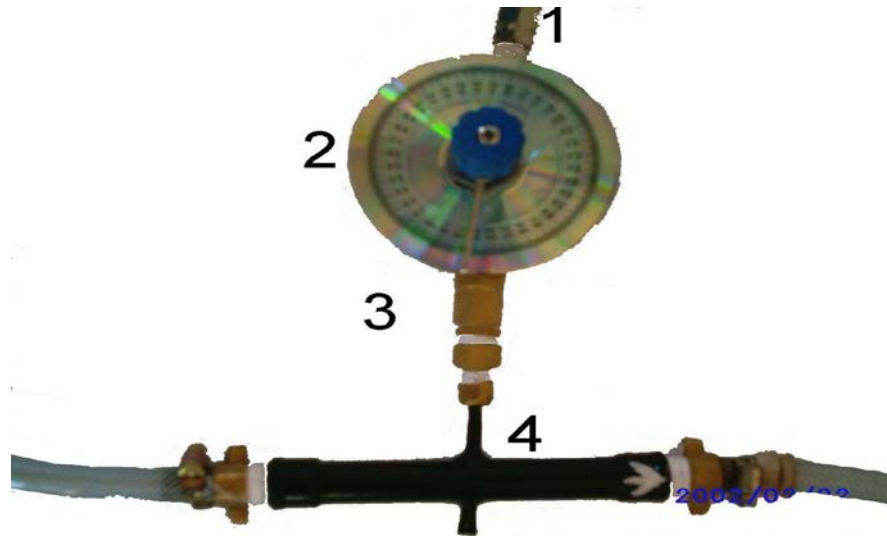


Figura 20. Inyector y regulador, 1) Válvula de retención. 2) Regulador de caudal. 3) Conector. 4) Inyector.

Como se mencionó anteriormente los fluidos se desplazan por un diferencial de energía (ecuación 4), se ve que la inyección va a depender del diferencial de presión entre la presión de EPA y la del CHP, por lo cuál se acopló el inyector a la salida del banco y se midió las presiones del banco y del sistema dosificador.

Si el circuito hidráulico está a 0,3 MPa, y el sistema dosificador a 0,4 MPa, el caudal entregado debería ser semejante al obtenido al dosificar (sin inyectar) a 0,1 MPa. Por lo tanto, se realizaron las pruebas ajustando el regulador de caudal a diferentes posiciones (presión constante de 0,1 MPa), y se midió el caudal de agua y la del aire. Posteriormente el banco de pruebas se fijó a 0,3 MPa y se inyectó ajustando el aire a una presión de 0,4 MPa (diferencial de presión de 0,1 MPa). Lo obtenido al dosificar a 0,1 MPa, y al inyectar con un diferencial de 0,1 Mpa, presenta una correlación de 0,9998, lo que significa que existe una correlación entre el caudal medido a 0,1 MPa, con el caudal de aire medido a 0,3 MPa el CHP y 0,4 MPa EPA. En la gráfica de la Figura 20 se muestra los datos obtenidos y la curva de regresión lineal con un coeficiente de determinación de 0,9997. Esto nos permite determinar el caudal a inyectar al CHP conociendo el caudal a 0,1 MPa, siendo inyectado con un diferencial de 0,1 MPa al CHP, es decir para la calibración del sistema dosificador.

Para corroborar los datos anteriores, se procedió a realizar dos ensayos más con un diferencial de 0,1 MPa, regulando la presión del banco de pruebas (CHP) a 0,2 y 0,1 MPa y la presión del dosificador a 0,3 y 0,2 MPa respectivamente (diferencial de 0,1 MPa), se obtuvieron los mismos caudales que los de la gráfica de la Figura 21.

Se realizó la prueba de inyección al CHP en el tiempo con dosis mínima y máxima por 10 minutos, obteniéndose que la dosificación no varió, lo que difiere con lo obtenido en la Figura 16 y 17 en donde la dosificación variaba en el tiempo (aunque nunca más de lo permitido) esto puede ser explicado por el método empleado para determinar el caudal poco exacto, de pesar el caudal recibido durante un determinado periodo de tiempo.

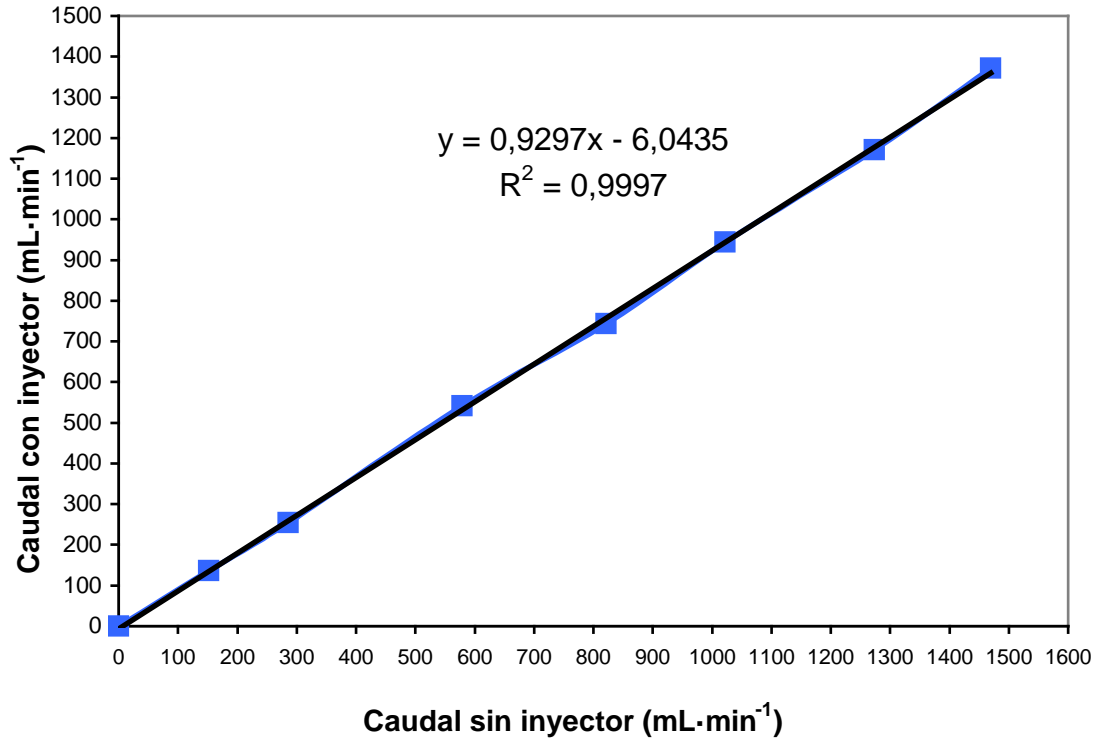


Figura 21. Relación entre caudal entregado con y sin sistema inyector. Inyectado con un diferencial de 0,1MPa de presión entre CHP y el EPA.

Se debe tener presente que las pruebas de inyección se realizaron con una bomba de engranajes la cuál no genera un pulso de presión y de caudal, por lo tanto sería importante evaluar la inyección con una bomba que genere este pulso, (como se mostró en la ecuación 4 la presión del CHP también influye en el caudal a inyectar) para evaluar la variación del caudal de inyección.

Diseño definitivo

Ya probado el prototipo base con diferentes formas de regulación del caudal a inyectar, y haber probado la inyección al circuito hidráulico de la pulverizadora. A continuación se indican las características que debería poseer el diseño definitivo sin olvidar las ya mencionadas para la regulación de caudal y de inyección.

Estanque de almacenamiento de aire comprimido (EAAC)

Ya seleccionado el sistema de regulación por sección variable a presión constante, el EAAC es más fácil de diseñar, por ser constante la presión, ya que si fuera por presión variable se necesita un mayor volumen para obtener mayor presión por lo tanto el compresor debería funcionar por más tiempo aumentando gasto de energía y su desgaste.

Capacidad. Se diseño para proporcionar aire suficiente para vaciar una carga completa del estanque de producto. Calculando el volumen necesario para descargar completamente el EPA, esto mediante la siguiente ecuación:

$$P_a \times V_a = P_p \times V_p \quad (6)$$

P_a = Presión del estanque de acumulación de aire comprimido.

V_a = Volumen del estanque de acumulación de aire comprimido.

P_p = Presión del estanque de producto.

V_p = Volumen del estanque de producto.

Considerando que se acumulará a una presión de 1 MPa y se inyectará a una presión de 0,4 MPa, si la pulverizadora opera a 0,3 MPa de presión El volumen del estanque de acumulación de aire comprimido será de 10 L.

Estanque de productos agroquímicos (EPA)

La máxima dosis determinará la capacidad del estanque, como son pocos los productos que se aplican a ésta dosis, siendo más común dosis de 1 a 10 L·ha⁻¹ Por lo tanto se eligió que la capacidad del estanque sea de 15 L para poder aplicar de 1 a más de 15 hectáreas con una carga de producto.

La forma cilíndrica, se eligió para el EPA, porque es la forma en que se tiene la mayor relación superficie volumen, considerando su costo de fabricación. (se puede fabricar a partir de tuberías y recubrir con pintura epóxica).

En el EPA del prototipo, el aire comprimido estaba en contacto directo con el agua (producto), esto en condiciones de campo resultaría un problema ya que con el movimiento y con una pequeña cantidad de líquido en el estanque, el aire podría ser inyectado en lugar del producto, causando un error en la dosificación, además al liberar la presión del EPA el aire salía mezclado con pequeñas gotas de agua (aerosol), lo que constituye un riesgo de contaminación para el operario. Por esto el estanque definitivo debería llevar una membrana elástica entre el aire comprimido y el producto, la que transmitiría la energía neumática al producto a dosificar.

Panel de control neumático

Se mantendría el mismo diseño que del prototipo, solo cambiaría el medidor de caudal por uno digital el que permitiría obtener un registro del caudal inyectado y monitorizar durante la aplicación el caudal.

Funcionamiento del sistema dosificador

El funcionamiento del sistema dosificador se dividió en cuatro etapas, y se explican a continuación con el diagrama de la Figura 22 y Apéndice VIII.

Incorporación del agroquímico en el EPA. Primero se enciende el compresor N° 1, se espera a que se llene el estanque de acumulación de aire comprimido N° 3 y se abre la válvula N° 7 el aire entra al estanque N° 10 y se infla la membrana N° 9, luego se deposita el producto a aplicar en el estanque N° 21, se abre la válvula N° 20 y la 8, el aire sale por ésta válvula del estanque N° 10 generando un vacío en el estanque succionando el producto por el filtro N° 19.

Calibración del dosificador. Luego de tener el producto en el estanque N° 10 (EPA) y tener el compresor encendido (éste va a estar comandado por el presostato N° 2 lo enciende cuando la presión sea menor de 0,4 MPa) se regula la presión con el regulador N° 4 a 0,1 MPa, se abre la válvula N° 7, el aire entra al estanque N° 10, luego de elegir una dosis se calcula la posición del regulador de caudal con el modelo antes presentado, se coloca el regulador de caudal N° 13 en posición y se cierra la válvula N° 17 y se abren las válvulas N° 12 y 18 lo que resulta es un flujo del agroquímico del estanque N° 10 al estanque N° 21. Éste flujo se medirá con el medidor de caudal N° 6 y se realizarán los ajustes en el regulador N° 13. Luego de calibrada la dosis se cierran las válvulas N° 7, 11 y 18 y se abre la válvula N° 17 y 20 ésta para permitir el reingreso al estanque N° 10 abriendo la válvula N° 8.

Recuperación del agroquímico. Luego de realizada la aplicación, puede quedar un remanente de producto el cuál se puede recuperar cerrando la válvula N° 12 y abriendo la válvula N° 11 y se recupera el agroquímico colocado el envase a su salida (válvula N° 11); estando todavía presurizado el estanque N° 10.

Lavado del sistema. Luego que el estanque N° 10 ésta vacío, se vuelve a presurizar cerrando la válvula N° 11, con la válvula N° 7 aun abierta, se cierra la válvula N° 17 y se abre la válvula N° 18 se pone en movimiento la bomba de la pulverizadora, ingresará agua de la pulverizadora por la válvula N° 18 al estanque N° 21, luego para ingresar el agua se abren las válvula N° 20 y 8 luego estas se cierran y se hace pasar el agua por el sistema dosificador, para completar el lavado, con la bomba de la pulverizadora detenida se abre la válvula N° 12 y el regulador de caudal N° 13 se abre completamente, ésta operación se realiza tres veces. Para eliminar el agua ésta se elimina a través del circuito hidráulico de la

pulverizadora, abriendo la válvula N° 17 y cerrando la N° 18 inyectando a la red y se continúa el lavado a la maquina pulverizadora.

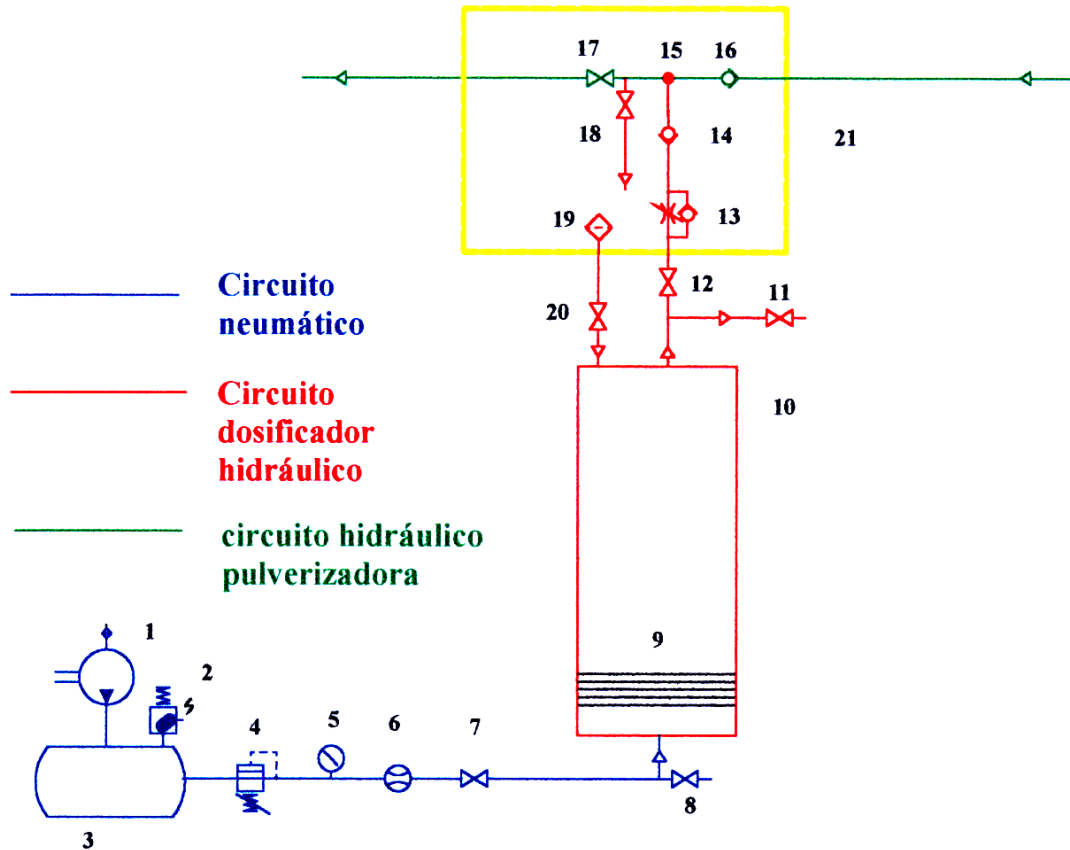


Figura 22. Plano del sistema dosificador (SDAP). 1) Compresor. 2) Presostato. 3) Estanque de almacenamiento de aire comprimido (EAAC). 4) Regulador de presión. 5) Manómetro. 6) Medidor de caudal. 7) Válvula entrada de aire EPA. 8) Válvula de salida de aire del EPA. 9) Membrana elástica. 10) Estanque de productos agroquímicos (EPA). 11) Válvula de recuperación de agroquímicos. 12) Válvula de salida de agroquímico. 13) Regulador de caudal. 14) Válvula antirretorno. 15) Inyector. 16) Válvula antirretorno de CHP. 17) Válvula de paso del CHP. 18) Válvula para calibración y lavado. 19) Filtro del EPA. 20) Válvula entrada al EPA.

Mediante el reemplazo de las válvulas en la Figura 22, por electro válvulas comandadas por un sistema electrónico se automatizarían las cuatro etapas vistas, permitiría realizar un trabajo dentro del concepto de agricultura de precisión.

A éste diseño todavía necesita aun un mayor desarrollo, más pruebas de laboratorio y pruebas de campo para evaluar su desempeño y perfeccionar sus componentes.

CONCLUSIONES

Se logro diseñar un dosificador de agroquímicos líquidos y construir un prototipo, el cuál utiliza energía neumática como impulsor.

El sistema hidroneumático permite múltiples formas de regulación de caudal por sección constante a presión variable, Sección variable a presión constante, Combinación de secciones constante y Secciones y presiones variables, minimizando el contacto con los agroquímicos.

El sistema hidroneumático, con todas las formas de regulación probadas genera un caudal constante.

Con la amplia gama de caudales de inyección obtenido por el sistema dosificador de agroquímicos para pulverizadoras (SDAP) diseñado, se puede ajustar éste, a cualquier ancho de aplicación.

El SDAP se puede montar a pulverizadoras desde su fabricación o a pulverizadoras ya en uso, incluso se puede montar a turbo nebulizadoras y ser utilizadas para aplicar herbicidas y agroquímicos al huerto frutal sin temor a dañarlo.

Es factible utilizar un medidor de caudal de aire para medir el caudal de diferentes productos químicos sin importar sus propiedades.

Este sistema mediante el reemplazo de los elementos manuales por electrónicos permitiría realizar un trabajo dentro del concepto de agricultura de precisión.

BIBLIOGRAFIA

FAISANDIER, J. 1965. Los mecanismos hidráulicos, Dunod, Paris. 382p.

HETZ, E. M., IBÁÑEZ, L. CONCHA, F. REYES y R. CELIS. 1978. Mecanización agrícola en Chile. Universidad de Concepción, Instituto de Ingeniería Agrícola, Departamento de Mecanización Agrícola. Chillán, Chile 94p.

KOGAN, M. 1992. Malezas ecofisiología y estrategias de control, Publicación de la Facultad de Agronomía Pontificia Universidad Católica de Chile Departamento de Ciencias Vegetales, Santiago, Chile. 402p.

MATAIX, C. 1982. Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas, Harla, México. 658p.

SERRANO, A. 1999. Neumática, Editorial Paraninfo, Madrid. 390p.

VÁZQUEZ, J. 2004. Aplicación de productos fitosanitarios, técnicas y equipos, Ediciones Agrotécnicas, Madrid. 389p.

VILLA, R. 1997. Técnicas y máquinas para la aplicación de pesticidas. Publicaciones docente N° 2, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Departamento de Ingeniería y Suelos. Santiago, Chile 114p.

APÉNDICES

Apéndice I. Relación entre velocidad y dosis

Velocidad (km·hr ⁻¹)	Caudales									
	Dosis (L·ha ⁻¹)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	(mL·min ⁻¹)									
1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2
2	0,04	0,08	0,12	0,16	0,2	0,24	0,28	0,32	0,36	0,4
3	0,06	0,12	0,18	0,24	0,3	0,36	0,42	0,48	0,54	0,6
4	0,08	0,16	0,24	0,32	0,4	0,48	0,56	0,64	0,72	0,8
5	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
6	0,12	0,24	0,36	0,48	0,6	0,72	0,84	0,96	1,08	1,2
7	0,14	0,28	0,42	0,56	0,7	0,84	0,98	1,12	1,26	1,4
8	0,16	0,32	0,48	0,64	0,8	0,96	1,12	1,28	1,44	1,6
9	0,18	0,36	0,54	0,72	0,9	1,08	1,26	1,44	1,62	1,8
10	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2

Apéndice II. Caudales obtenidos de una sección de 1 mm de diámetro

Evento	Caudales											
	Presión (MPa)											
	0,025	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,6
	(mL·min ⁻¹)											
1		469,2	643,8	753,6	709,8	794,4	858,6	958,2	987	1039,8	1087,8	
		468,6	647,4	754,2	709,8	790,8	856,2	945	989,4	1038	1102,8	
Promedio		468,9	645,6	753,9	709,8	792,6	857,4	951,6	988,2	1038,9	1095,3	
desv esta		0,42	2,55	0,42	0,00	2,55	1,70	9,33	1,70	1,27	10,61	
2	379,8	468	643,8	756,6	718,8	803,4	875,4	933,6	1002	1065,6	1133,4	1202,4
	378,6	466,2	643,8	756	716,4	800,4	870	934,8	1000,2	1062,6	1137	1201,8
Promedio	379,2	467,1	643,8	756,3	717,6	801,9	872,7	934,2	1001,1	1064,1	1135,2	1202,1
desv esta	0,85	1,27	0,00	0,42	1,70	2,12	3,82	0,85	1,27	2,12	2,55	0,42
3	384	465,6	653,4	767,4	739,2	810,6	898,2	952,2	997,8	1080	1142,4	1231,8
	383,4	465	652,2	767,4	741,6	810,6	899,4	953,4	994,8	1078,2	1140	1245,6
Promedio	383,7	465,3	652,8	767,4	740,4	810,6	898,8	952,8	996,3	1079,1	1141,2	1238,7
desv esta	0,42	0,42	0,85	0,00	1,70	0,00	0,85	0,85	2,12	1,27	1,70	9,76
4	384	466,2	631,2	755,4	724,8	808,8	886,2	931,2	999	1072,2	1110	1240,2
	382,2	463,2	633	756	723,6	807	889,8	934,2	1002	1068	1111,2	1246,2
Promedio	383,1	464,7	632,1	755,7	724,2	807,9	888	932,7	1000,5	1070,1	1110,6	1243,2
desv esta	0,64	1,06	0,64	0,21	0,42	0,64	1,27	1,06	1,06	1,48	0,42	2,12

Apéndice III. Datos caudales sección y presión variable

Posición del regulador (°)	Caudales						
	Presión (MPa)						
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35
	(mL·min ⁻¹)						
90	72,2	143	182	244	236	302,4	303,6
	71,4	141,8	179,2	240,8	238	298,4	294
	72,4	139,6	181	235,2	238,4	304	306,4
Promedio	72	141,46	180,73	240	237,46	301,6	301,33
Desv est	0,52	1,72	1,41	4,45	1,28	2,88	6,5
180	87,8	160	213,6	262,8	307,6	354	395,2
	89,2	159,6	211	262,4	308	353,2	392
	89	160,2	212,4	262,8	307,6	352	390
Promedio	88,66	159,93	212,33	262,66	307,73	353,07	392,40
Desv est	0,75	0,3	1,3	0,23	0,23	1,01	2,62
270	127,1	212	289,2	362,8	400,8	478,4	520
	127,5	213,2	291,8	361,2	401,6	474	508
	123,6	211,6	289,4	360	398,4	476	517,2
Promedio	126,06	212,26	290,13	361,33	400,27	476,13	515,07
Desv est	2,14	0,83	1,44	1,4	1,67	2,20	6,28
360	221,4	330,4	467,4	544,8	564,8	665,6	674,4
	222,6	332,2	466	543,2	566,4	658,4	660,4
	222,4	332,2	466	547,2	562	652,8	636,4
Promedio	222,13	331,6	466,46	545,06	564,4	658,93	657,07
Desv est	0,64	1,04	0,81	2,01	2,23	6,42	19,22
450	250,2	426,2	575,4	716,8	806,4	886,4	920
	252,8	424,8	576	726	800	889,2	939,6
	252,8	425,8	582,2	725,6	808,4	884	920,8
Promedio	251,93	425,6	577,866	722,8	804,93	886,53	926,8
Desv est	1,50	0,72	3,76	5,20	4,39	2,60	11,09
540	306	561	759,6	860,8	981,2	1087,2	1212,8
	309,6	556	756,2	859,6	983,6	1082,4	1220,4
	308,6	562,8	760	841,2	974	1078	1208,8
Promedio	308,06	559,93	758,6	853,86	979,6	1082,53	1214
Desv est	1,86	3,52	2,09	10,99	5,00	4,60	5,89
630	357	635,6	888	1003,2	1164,4	1266	1388,8
	355,4	635	883,4	1032	1147,2	1267,2	1380
	356,4	636,2	880	1000,8	1164	1271,2	1400
Promedio	356,27	635,60	883,80	1012	1158,53	1268,13	1389,60
Desv. Est.	0,81	0,60	4,01	17,36	9,82	2,72	10,02
720	421	740,4	990,8	1168,8	1399,2	1430	1740
	418,8	745,44	977,2	1168	1390,8	1425,6	1746
	419	745,68	1008,4	1160,8	1383,6	1439,6	1741,8
Promedio	419,6	743,84	992,133	1165,87	1391,2	1431,73	1742,6
Desv. Est.	1,22	2,98	15,64	4,41	7,81	7,16	3,08

Apéndice IV. Combinación de secciones

Combinaciones	Caudales							
	Presión (MPa)							
	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35
	(mL·min ⁻¹)							
1 = 180°	0	88,67	159,93	212,33	262,67	307,73	353,07	392,40
2 = 270°	0	126,07	212,27	290,13	361,33	400,27	476,13	515,07
3 = 450°	0	251,93	425,60	577,87	722,80	804,93	886,53	926,80
1	0	88,67	159,93	212,33	262,67	307,73	353,07	392,40
2	0	126,07	212,27	290,13	361,33	400,27	476,13	515,07
3	0	251,93	425,60	577,87	722,80	804,93	886,53	926,80
1 – 2	0	214,73	372,20	502,47	624,00	708,00	829,20	907,47
1 – 3	0	340,60	585,53	790,20	985,47	1112,67	1239,60	1319,20
2 – 3	0	378,00	637,87	868,00	1084,13	1205,20	1362,67	1441,87
1 – 2 – 3	0	466,67	797,80	1080,33	1346,80	1512,93	1715,73	1834,27

Apéndice V. Dosis, dadas por combinación de secciones y velocidades a 0,1 MPa de presión.

Velocidad	Dosis						
	Combinaciones						
	1	2	3	12	13	23	123
km·hr ⁻¹	L·ha ⁻¹						
1	8,00	10,61	21,28	18,61	29,28	31,89	39,89
2	4,00	5,31	10,64	9,31	14,64	15,95	19,95
3	2,67	3,54	7,09	6,20	9,76	10,63	13,30
4	2,00	2,65	5,32	4,65	7,32	7,97	9,97
5	1,60	2,12	4,26	3,72	5,86	6,38	7,98
6	1,33	1,77	3,55	3,10	4,88	5,32	6,65
7	1,14	1,52	3,04	2,66	4,18	4,56	5,70
8	1,00	1,33	2,66	2,33	3,66	3,99	4,99
9	0,89	1,18	2,36	2,07	3,25	3,54	4,43
10	0,80	1,06	2,13	1,86	2,93	3,19	3,99

Apéndice VI. Modelo comparado con grupo 3.

Posición regulador	Caudal entregado (mL·min ⁻¹)	Caudal esperado (mL·min ⁻¹)	Error (%)	Promedio
Fórmula = $-0,0137 X^2 + 2,7408 X - 6 \cdot 10^{-14}$				
50	102,1	102,79	0,67	0,67
50	101,6	102,79	0,97	
50	102,4	102,79	0,38	
90	136	135,70	0,22	0,32
90	135,2	135,70	0,37	
90	137,2	135,70	1,10	
Fórmula = $0,0019 X^2 - 0,2807 X + 145,77$				
90	136	135,90	0,08	0,17
90	135,2	135,90	0,51	
90	137,2	135,90	0,96	
180	155,6	156,80	0,77	0,94
180	156	156,80	0,51	
180	154,4	156,80	1,53	
Fórmula = $-0,0018 X^2 + 2,501 X - 336,13$				
270	198	208,16	4,88	4,95
270	198,8	208,16	4,50	
270	196,8	208,16	5,46	
360	324,8	331,27	1,95	2,12
360	323,2	331,27	2,44	
360	324,8	331,27	1,95	
450	414,4	425,23	2,55	2,86
450	413,6	425,23	2,73	
450	411,2	425,23	3,30	
Fórmula = $0,0021 X^2 - 1,2019 X + 536,78$				
450	414,4	421,18	1,61	1,93
450	413,6	421,18	1,80	
450	411,2	421,18	2,37	
540	501,6	500,11	0,30	0,11
540	502,4	500,11	0,46	
540	498	500,11	0,42	
630	601,2	613,07	1,94	1,04
630	608	613,07	0,83	
630	610,8	613,07	0,37	
Fórmula = $-0,0019 X^2 + 4,3171 X - 1346,6$				
630	601,2	619,06	2,89	2
630	608	619,06	1,79	
630	610,8	619,06	1,33	
720	758,8	776,75	2,31	2,12
720	762	776,75	1,90	
720	760	776,75	2,16	
810	893,6	903,66	1,11	1,79
810	882	903,66	2,40	
810	886,8	903,66	1,87	

(Continúa)

Apéndice VI. Modelo comparado con grupo 3. (Continuación)

Posición regulador	Caudal entregado (mL·min ⁻¹)	Caudal esperado (mL·min ⁻¹)	Error (%)	Promedio
Fórmula = $-0,0019 X^2 + 4,3171X - 1346,6$				
900	961,6	999,79	3,82	4,85
900	946	999,79	5,38	
900	946,4	999,79	5,34	
990	1051,6	1065,139	1,27	2,13
990	1035,6	1065,139	2,77	
990	1040	1065,139	2,36	
Fórmula = $-0,0033 X^2 + 9,2356 X - 4857,6$				
990	1051,6	1051,31	0,03	0,85
990	1035,6	1051,31	1,49	
990	1040	1051,31	1,08	
1080	1318,2	1267,73	3,98	4,39
1080	1329,6	1267,73	4,88	
1080	1322,4	1267,73	4,31	
1170	1413,6	1430,68	1,19	1,85
1170	1395,6	1430,68	2,45	
1170	1403,4	1430,68	1,91	
1260	1533,6	1540,18	0,43	0,57
1260	1530,6	1540,18	0,62	
1260	1530	1540,18	0,66	

Apéndice VII. Modelo comparado con grupo 4.

Posición regulador	Caudal entregado (mL·min ⁻¹)	Caudal esperado (mL·min ⁻¹)	Error (%)	Promedio
Fórmula = $-0,0137 X^2 + 2,7408 X - 6 \cdot 10^{-14}$				
50	101,9	102,79	0,86	0,82
50	102,3	102,79	0,47	
50	101,6	102,79	1,158	
90	133,2	135,702	1,84	0,08
90	138	135,702	1,69	
90	135,6	135,702	0,08	
Fórmula = $0,0019 X^2 - 0,2807 X + 145,77$				
90	136	135,90	0,08	0,17
90	135,2	135,90	0,51	
90	137,2	135,90	0,96	
180	156	156,80	0,51	1,53
180	154,8	156,80	1,28	
180	152,4	156,80	2,81	

(Continúa)

Apéndice VII. Modelo comparado con grupo 4 (Continuación)

Posición regulador	Caudal entregado (mL·min ⁻¹)	Caudal esperado (mL·min ⁻¹)	Error (%)	Promedio
Fórmula = - 0,0018 X ² + 2,501 X – 336,13				
270	198	208,16	4,88	4,95
270	198,8	208,16	4,50	
270	196,8	208,16	5,46	
360	344,8	331,27	4,08	4,24
360	346,4	331,27	4,57	
360	344,8	331,27	4,08	
450	430	425,23	1,12	1,66
450	432,8	425,23	1,78	
450	434	425,23	2,06	
Fórmula = 0,0021 X ² - 1,2019 X + 536,78				
450	414,4	421,18	1,61	1,93
450	413,6	421,18	1,80	
450	411,2	421,18	2,37	
540	510,8	500,11	2,14	2,40
540	512	500,11	2,38	
540	513,6	500,11	2,70	
630	602,4	613,07	1,74	2,09
630	601,2	613,07	1,94	
630	597,2	613,07	2,59	
Fórmula = -0,0019 X ² + 4,3171X – 1346,6				
630	601,2	619,06	2,89	2
630	608	619,06	1,79	
630	610,8	619,06	1,33	
720	711,2	776,75	8,44	7,86
720	718,4	776,75	7,51	
720	717,6	776,75	7,62	
810	898,4	903,66	0,58	0,57
810	907,6	903,66	0,44	
810	889,6	903,66	1,56	
900	984	999,79	1,58	1,08
900	982,2	999,79	1,76	
900	1000,8	999,79	0,10	
990	1065,6	1065,14	0,04	0,79
990	1085,4	1065,14	1,90	
990	1069,8	1065,14	0,44	

Continúa

Apéndice VII. Modelo comparado con grupo 4 (Continuación)

Fórmula = $- 0,0033 X^2 + 9,2356 X - 4857,6$				
990	1051,6	1051,31	0,03	
990	1035,6	1051,31	1,49	0,85
990	1040	1051,31	1,08	
1080	1265,4	1267,73	0,18	
1080	1260,6	1267,73	0,56	0,53
1080	1257	1267,73	0,85	
1170	1408,2	1430,68	1,57	
1170	1387,8	1430,68	3,00	2,38
1170	1393,8	1430,68	2,58	
1260	1551,6	1540,18	0,74	
1260	1500	1540,18	2,61	1,37
1260	1505,4	1540,18	2,26	

Apéndice VIII. Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema dosificador.

