

DISEÑO Y MONTAJE DE UN SIMULADOR DE LLUVIA PARA ENSAYOS DE CAMPO: “ARLOAN”

PEDRO J. CERVANTES RODRÍGUEZ

*Trabajo de Fin de Carrera
Ingeniería Técnica Agrícola
Sevilla, 2015*



Diseño y montaje de un simulador de lluvia para ensayos de campo: ARLOAN

Diseño y montaje de un simulador de lluvia para ensayos de campo: ARLOAN

Pedro José Cervantes Rodríguez

Proyecto de Fin de Carrera

Ingeniería Técnica Agrícola

29 de enero de 2015



Diseño y montaje de un simulador de lluvia para ensayos de campo: ARLOAN

El Autor



Pedro José Cervantes Rodríguez

El Tutor



Dr. Arturo J. Pascual Granged

Los Directores



Dr. Ángel J. Gordillo Rivero



Dr. Jorge García Moreno

Sevilla, 2015



Agradecimientos

En el proceso de este proyecto, muchas personas han aportado mucho, desde permitirme tener tiempo para escribir, hacer unas bolsas para transportar el material, descolgar el teléfono para charlar un rato ... y a todos ellos los incluyo aquí para agradecer todo lo que han hecho por mí.

En especial a mi mujer, que en los días más difíciles ha sido capaz de sacarme una sonrisa, junto a mis hijos César y Lola, que sólo puedo darle las gracias por tenerlos junto a mí. A mi familia, mi padre, hermana y hermano, por apoyarme en esta tarea, por su preocupación y cariño que siempre me han demostrado. A mi suegra que en todo momento ha tenido palabras de aliento.

En la confección, he podido contar con la ayuda de mi tutor Arturo que me ha hecho partícipe de esta idea y que con sus visitas a casa me ha resuelto dudas tras recibir mis llamadas de auxilio. A mis directores, Jorge, que por caprichos del destino, nos ha unido en este camino que sin duda no olvidaré. Y Ángel, que siempre tenía tiempo para hablar conmigo. Nuestra amistad, que ya teníamos, se ha consolidado demostrando que siempre, y digo siempre, ha estado y está cuando se le necesita.

A Antonio de MED_Soil Research Group, por su apoyo en este proceso de elaboración y dejarme formar parte de esta aventura de la lluvia simulada. A Lorena, también de MED_Soil Research Group por compartir sus opiniones en momentos de duda.

A todos los que no nombro, pero que en el transcurso de mi carrera han aportado su granito de arena para concluir mis estudios, GRACIAS.

Tabla de contenido

1	Introducción	13
1.1	Necesidad del uso de técnicas de simulación de lluvia	13
1.2	Principales características de los simuladores de lluvia	15
1.3	Antecedentes	17
1.4	Justificación y objetivos	18
2	Diseño de un simulador de lluvia	21
2.1	Estructura	21
2.2	Impulsión de agua	24
2.3	Control electrónico	26
2.3.1	Hardware	26
2.3.2	Software	29
	Lenguaje de programación	29
	Menú de trabajo	29
	Programa	30
2.4	Montaje	34
3	Especificaciones técnicas	35
	Referencias	37
	Lista de figuras y tablas	41
	Figuras	41
	Tablas	41
	Anexo 1. Presupuesto	43
	Anexo 2. Programa	45
	Anexo 3. Planos	49

1 Introducción

1.1 Necesidad del uso de técnicas de simulación de lluvia

El estudio de los procesos hidrológicos y erosivos del suelo se basa con frecuencia en el análisis de las tasas de producción de escorrentía e infiltración del agua de lluvia, así como la intensidad del transporte de sedimentos por el flujo de agua superficial. Este estudio es importante en áreas con riesgo de erosión hídrica, como ocurre en las zonas de clima mediterráneo o más árido. En la zona mediterránea, por ejemplo, el clima está caracterizado por un verano cálido y seco seguido de una estación fresca y lluviosa. Además de la concentración de lluvias en una estación húmeda y una alta irregularidad interanual, la precipitación de las zonas de clima mediterráneo posee una intensidad muy variable, desde muy suave a torrencial. Por ello, y especialmente al comienzo de la estación húmeda, cuando el suelo está especialmente desprotegido, existe un gran riesgo de erosión hídrica. La degradación del suelo debido a la erosión preocupa mucho a los investigadores ya que puede llegar a constituir un daño irreversible y es una de las causas de desequilibrio ecológico (Daba Fufa et al., 2002).

Sin embargo, el primer problema que se encuentra en el diseño de experimentos es la dificultad para predecir el momento y las características de la precipitación. Por ello, es necesario en muchos casos recurrir a experimentos con lluvia simulada. Los experimentos de simulación de lluvia deben ser diseñados para aplicar agua al suelo de manera similar a una lluvia natural, controlando la cantidad de lluvia, su intensidad y duración, por lo que son útiles para el estudio de los procesos del suelo bajo el impacto de la precipitación (Meyer, 1994) y el estudio de la erosión, la infiltración, escorrentía superficial y el transporte de sedimentos. A pesar de esto, una revisión de los simuladores de lluvia existentes en la actualidad muestra que la mayoría de ellos no tiene éxito al simular un flujo de energía característico de una lluvia natural (Abudi et al., 2012), normalmente menor (Highnett et al., 1995).

La simulación de lluvia se ha convertido en un método importante para el estudio de la erosión del suelo y los procesos hidrológicos superficiales o subsuperficiales (ver, por ejemplo, Cerdà, 1999). La necesidad de distinguir entre diferentes subprocesos de generación de escorrentía y erosión, por ejemplo, ha llevado al desarrollo de diferentes instrumentos de simulación de lluvia a escala de plot (por ejemplo, 1 m²) (Calvo et al., 1988).

Como desventaja, los simuladores de lluvia presentan un diseño complejo y una manipulación complicada, así como un área de trabajo relativamente limitada, normalmente menor de 1 m² (Abudi et al., 2012; Highnett et al., 1995; Schindler-Wildhaber et al., 2012). Los datos obtenidos mediante experimentos de simulación de lluvia no pueden extrapolarse fácilmente a las

condiciones naturales, aunque pueden ser fácilmente utilizados con fines comparativos. Una de las grandes dificultades existentes al momento de estudiar el riesgo de erosión hídrica del suelo, es la necesidad de contar con una lluvia natural, ya que es muy difícil predecir con certeza, dónde y cuándo lloverá, así como tampoco se puede saber si el evento tendrá la intensidad y duración necesaria para producir erosión (Sánchez & Asseline, 1999), por eso surge la necesidad de crear una herramienta de trabajo para realizar dichos estudios.

Por otro lado, las condiciones naturales no son posibles de reproducir debido a limitaciones físicas, como por ejemplo, la altura de la que cae la lluvia hace que adquiera una energía cinética, y el conocimiento de estos factores se hacen esencial para su repetición. Por lo que mientras que los sucesos naturales son muy variables, los parámetros de distribución, intensidad, duración o la velocidad de la gota se mantienen constantes en los experimentos que se reproducen con la simulación (Iserloh et al., 2012).

Sin embargo, para una interpretación fiable de los datos obtenidos, es necesario que la lluvia simulada produzca un impacto similar al de una lluvia natural, y parámetros como el tiempo de generación de escorrentía, la tasa de escorrentía o la pérdida de suelo deben ser analizados cuidadosamente. El principal problema para el diseño de experimentos de simulación de lluvia es la réplica de las características de un episodio específico o representativo de lluvia natural. Según Meyer (1994), Meyer y McCune (1958) y Bubenzer et al. (1979), las principales características de la precipitación natural que deben ser simuladas son la distribución uniforme y aleatoria de las gotas de lluvia en la superficie analizada, la distribución de tamaños de las gotas de lluvia, la energía cinética y velocidad terminal de las gotas de lluvia en el momento del impacto sobre la superficie del suelo y la intensidad de la lluvia.

En la actualidad, los simuladores de lluvia se utilizan tanto para estudiar los procesos hidrológicos (infiltración y escorrentía) como erosivos (Ibañez et al. 2012; Agassi & Bradford, 1999), tanto en laboratorio como en campo, ya que son fiables, rápidos, eficientes y permiten un gran control de todos los parámetros necesarios, permitiendo la comparación de los resultados obtenidos con sucesos naturales (Meyer, 1988). A escala de procesos, el objetivo principal de la simulación de lluvia a escala de plot es la cuantificación de la infiltración, la generación de la escorrentía, el desprendimiento de partículas y desagregación, la concentración de la escorrentía incipiente y las tasas de transporte de sedimentos asociados (Bowyer-Bower y Burt, 1989; Seeger, 2007). Los simuladores pequeños permiten estudiar estos parámetros, que en muchas ocasiones están condicionados por la cobertura vegetal o la composición de la vegetación, así como la presencia de otros elementos (presencia de piedras

o sellado superficial (Le Bissonais et al., 2005; Martínez-Zavala y Jordán, 2008; Seeger, 2007). Con frecuencia, los resultados se obtienen con propósitos comparativos (Arnáez et al., 2007, Foster et al., 2000; Navas et al., 1990). Los simuladores de lluvia no pretenden sustituir los estudios de lluvia natural, sino complementarlos, siendo de gran utilidad, ya que nos aseguran una disposición de lluvia en el momento deseado. La lluvia simulada es utilizada para multitud de aspectos, como el estudio del impacto de infraestructuras (Selkirk y Riley 1996), de las prácticas de manejo agrícola (Jin et al. 2009) o la evaluación de la erosión hídrica (Gil et al. 2007). El hecho de poder reproducir la lluvia de manera controlada en un punto experimental concreto facilita el diseño experimental, la obtención de grandes cantidades de datos (Nolan et al. 1997) y la comparación entre ellos (Foster et al. 2000).

1.2 Principales características de los simuladores de lluvia

En la literatura científica puede encontrarse una gran variedad de simuladores de lluvia que han sido utilizados por diferentes investigadores. El tipo y las características del simulador deben adaptarse tanto al coste y disponibilidad como a los objetivos experimentales (Benito et al., 2001). Muchos de los simuladores de lluvia existentes en la actualidad son instrumentos de laboratorio adecuados para el trabajo con muestras de suelo alteradas en contenedores de poca profundidad. La simulación de lluvia aplicada a estas muestras puede arrojar luz sobre los procesos superficiales, pero los resultados pueden ser muy diferentes de los observados bajo condiciones de campo (Abudi et al., 2012).

Según Benito et al. (2001), existen dos tipos de simuladores de lluvia. En el primer caso, se trata de simuladores que producen lluvia mediante goteo. En este caso, la velocidad inicial de la gota es cero, lo que requiere alturas elevadas para simular un impacto natural sobre la superficie del suelo (Barros et al., 2008). Algunos autores han observado que los simuladores de lluvia mediante mecanismo de goteo pueden presentar dificultades debido a su difícil manejo en campo y a la dificultad para imitar la lluvia natural, siendo más adecuados para estudios bajo condiciones de laboratorio (Cerdà et al., 2010). Además, para que la energía cinética de la gota en el momento del impacto en el suelo sea adecuada, se han sugerido alturas de caída de entre 10 y 12 m (Benito et al., 2001; Epema y Riezebos, 1983). Otra desventaja de este tipo de simuladores (desde el punto de vista de la imitación de lluvia natural) es la falta de aleatoriedad en la distribución de los impactos, ya que todas las gotas producidas por el mismo gotero impactan en el mismo punto de la superficie del suelo. Debido a esto se han diseñado sistemas para introducir aleatoriedad en la distribución espacial y el tamaño de las gotas, como la aplicación de movimiento o vibración (Kleijn et al., 1979; Poesen, 1984), mallas entre los goteros y el suelo (Imeson et al., 1982) o el uso de aire comprimido (Brakensiek et al., 1979). Finalmente,

en muchos casos existe otra dificultad añadida, como es la necesidad de colocar los depósitos de agua en la parte alta del simulador de lluvia, lo que les da una gran inestabilidad. Aunque se ha conseguido simplificar su uso, y hacerlos portátiles y manejables (Hino et al., 1987; 1988; Kamphorst, 1987; McQueen, 1963; Blackburn et al., 1974). Sin embargo, los simuladores por goteo presentan también algunas ventajas, como el control de la distribución espacial de la lluvia mediante la variación en la disposición de los goteros o el cambio en la presión del agua (Mutchler y Hersmeier, 1965; Munn y Hungtinton, 1967). Aunque el tamaño de gota presenta escasa variación en cada modelo de simulador, distintos modelos o accesorios pueden ofrecer tamaños distintos, normalmente comprendidos entre 2.2 mm de diámetro medio de gotas en Bubbenzer y Jones (1971), hasta 5.6 mm en Adams et al. (1957).

En segundo lugar, existen simuladores basados en el uso de boquillas pulverizadoras, que impulsan el agua a una cierta velocidad, obteniendo una energía cinética similar a la natural (Laws, 1941). En función de la boquilla seleccionada, se pueden obtener lluvias de diferente intensidad y energía, lo que permite adaptar el experimento a las condiciones representativas de la zona. Sin embargo, la principal desventaja de estos simuladores es que sólo se logra una distribución de tamaños de gota similar a la natural a intensidades de lluvia relativamente altas. Existen mecanismos correctores, como el uso de discos giratorios (Morin et al., 1967) o de sistemas oscilantes (Neibling et al., 1981). En opinión de Cerdà et al. (2010), los simuladores que utilizan mecanismos de pulverización son aptos tanto para su uso en laboratorio como en zonas de difícil acceso.

De modo general, los simuladores de lluvia deben poseer ciertas características deseables tales como la facilidad de transporte, la disposición de una fuente de energía y el bajo consumo de agua, especialmente en el caso de experimentos de campo y en zonas de difícil acceso.

Meyer y McCune (1958) diseñaron un simulador capaz de producir una precipitación con una energía cinética similar a la lluvia natural, conocido como Rainulator, aplicable a parcelas de gran tamaño (Meyer, 1960). El logro de una lluvia intensa y con elevada energía se consiguió con el difusor 80100 Veejet, pero presentaba la desventaja de que las intensidades de la lluvia eran exageradamente elevadas y no comparables a una lluvia natural. Por ello, algunos autores introdujeron sistemas de oscilación del difusor (Asseline y Valentin, 1978; Bubbenzer y Meyer 1965; Foster et al., 1979) o el uso de diferentes modelos de difusor (Meyer y Harmon, 1979).

Morin et al. (1967) consiguieron reproducir bajas intensidades de lluvia con tamaños de gota elevados mediante el uso de discos que eliminaban parte de la lluvia producida a alta intensidad, un sistema que fue mejorado progresivamente por otros autores (Amerman et al., 1970; Gierson

y Oades, 1977; Marston, 1982). Desde la década de 1980 hasta la actualidad, se ha generado una gran cantidad de diseños en función de las necesidades de la investigación con diferente grado de complejidad y variabilidad en las prestaciones (Cerdà et al., 2010).

1.3 Antecedentes

En los años 30 y 40 del siglo XX surge la necesidad de medir factores relacionados con el riesgo de erosión y el comportamiento hidrológico del suelo que hasta la fecha se hacían mediante procedimientos que reproducían parcialmente la realidad, como podían ser las mediciones con infiltrómetros cilíndricos o las inundaciones de parcelas (Navas et al. 1990). A raíz de los episodios de *Dust Bowl* sufridos en EEUU en la década de 1930, se potenció la investigación que daría lugar al desarrollo de la *Universal Soil Loss Equation* (USLE; Wischmeier, 1959; Wischmeier y Smith, 1978) y, consecuentemente, a la cuantificación de los procesos erosivos, el estudio de la erosividad de la lluvia mediante la determinación del tamaño de las gotas de lluvia (Laws y Parsons, 1943) y la evaluación de la erosionabilidad de los suelos, junto a los estudios de la hidrología de laderas (Horton 1939). Todos estos fueron temas de investigación que se desarrollaron gracias y junto al diseño y desarrollo de los simuladores de lluvia.

A partir de 1930 se investigó con intensidad en el desarrollo de experimentos de lluvia simulada (Beutner et al., 1940; Holtan, 1961; Nichols y Sexton, 1932; Neal, 1938). Según Cerdà et al. (2010), estos primeros simuladores de lluvia estaban destinados a reproducir la lluvia en pequeñas parcelas, aunque la necesidad de estudios a mayor escala llevó al estudio de cuencas experimentales y a la construcción de simuladores de lluvia de mayores dimensiones (Christiansen, 1941; Izzard, 1944; Holtan y Kirkpatrick, 1950; Chow y Yen, 1974).

Sin embargo, el objetivo de los primeros simuladores de lluvia no era medir la erosividad de la precipitación, sino la distribución de agua sobre toda la superficie experimental. La demostración de que la erosividad de la lluvia depende del tamaño de gota y de la velocidad alcanzada durante los experimentos (Laws, 1941; Spilhaus, 1948) llevó al desarrollo de nuevos modelos de simuladores de lluvia con grandes innovaciones técnicas en todo el mundo.

El desarrollo de nuevos modelos de simuladores de lluvia permitió una alta especialización, existiendo más de doscientos modelos citados en la literatura científica en función de diferentes objetivos experimentales (Cerdà, 1999), que incluyen modelos con capacidad para reproducir una amplia gama de intensidades de lluvia, automatizados y manuales, pequeños y grandes, fáciles de transportar y manejar, pero también costosos en mantenimiento, transporte y uso. Se ha producido una clara tendencia hacia simuladores desmontables, aunque originalmente fuesen instrumentos pesados, costosos y de difícil manejo por su diseño para uso en campos

agrícolas donde se podía acceder con maquinaria pesada (Meyer, 1960). Según algunos autores, (Cerdà et al. ,2010; Lane, 1986), esta limitación de los estudios de simulación de lluvia con objetivos agronómicos fue solventada por la diversificación de diseños y objetivos de investigación en otras disciplinas como la ecología, la edafología, la geomorfología o la hidrología.

1.4 Justificación y objetivos

Iserloh et al. (2013) realizaron un estudio comparativo entre 13 simuladores de lluvias portátiles, con el objetivo de analizar las diferencias y similitudes más importantes entre ellos. Compararon el tamaño de las gotas, la velocidad de caída y su distribución espacial, con el objetivo de mostrar la necesidad de establecer un criterio unánime a la hora de valorar los datos obtenidos por los diferentes simuladores, ya que las diferencias entre los datos obtenidos con los diferentes simuladores pueden obtener resultados dispares en los parámetros calculados. Sin embargo, Bowyer-Bower y Burt (1989) sugirieron que el diseño de un simulador adecuado para todas las condiciones experimentales no era una meta factible, ya que diferencias aparentemente pequeñas entre diferentes simuladores llevaban a obtener datos engañosos en cuanto a infiltración, escorrentía y transporte de sedimentos.

Independientemente de las ventajas o desventajas que pueden presentar los modelos de simulación por goteo o mediante difusor, en general es necesario avanzar en la portabilidad del simulador, especialmente en los estudios de campo que requieren la realización de ensayos en zonas de difícil acceso.

Por otro lado, es necesario considerar que durante un evento de lluvia, la intensidad varía. La respuesta hidrológica del suelo, además, puede variar en el tiempo durante un mismo episodio de precipitación, ya que debido al impacto de las gotas y la escorrentía, se producen procesos de dispersión de sedimentos, desagregación de partículas, sellado superficial y oclusión de poros, lo que incide sobre las tasas de infiltración y escorrentía, así como sobre la producción y transporte de sedimentos. Sin embargo, una desventaja general en los simuladores de lluvia citados en la bibliografía es la imposibilidad para variar la intensidad de lluvia durante un mismo experimento. La producción de precipitación artificial con variaciones de intensidad exige la interrupción del experimento para la sustitución del depósito goteador o de las boquillas difusoras.

Por esta razón, en este trabajo se plantea el diseño de un simulador de lluvia de bajo coste, portátil (que pueda ser desmontado y transportado por dos o tres personas), y que permita el

uso de diferentes intensidades de lluvia durante intervalos de tiempo controlados en un mismo ensayo. Diseño del simulador de lluvia

A continuación se detalla la estructura, el mecanismo de impulsión de agua, el procedimiento de control electrónico y el montaje. En el Anexo 1 (pág. 43) se muestra el presupuesto de construcción.

2 Diseño de un simulador de lluvia

2.1 Estructura

El simulador está formado por una estructura de hierro con un tratamiento de galvanización para impedir que sufra deterioros por oxidación debido al contacto con el agua y la exposición a la intemperie. La estructura consta de dos plataformas conectadas entre sí por medio de cuatro tornillos de nivelación. La plataforma superior soportaría el depósito de agua y el sistema de goteo. A su vez, una plataforma inferior conectaría los pies que sustentarían todo el bloque en sí. Esta estructura se separa fácilmente en partes más manejables para hacer ágil su transporte, montaje y desmontaje. El depósito de agua se apoya sobre una plataforma soporte. Esta plataforma cuadrada sujeta al depósito de agua sin impedir que funcione correctamente el sistema de goteo. Está realizado con un perfil rectangular de 4 cm de ancho por 3 cm de alto, formando un marco cuadrado de 60 cm por cada lado. En las esquinas de la plataforma aparecen soldadas unas pletinas que cubren los últimos 15 cm de cada lado, sobresaliendo 2 cm, con la función de encajar el depósito y evitar así su desplazamiento. La plataforma posee cuatro anclajes en la cara inferior, opuesta a la fijación del depósito, situados justo en el centro de cada lado. En esos puntos se fijaron tornillos de nivelación mediante un mazo con rosca inversa (Figura 1). Para facilitar el proceso de nivelación, la plataforma también lleva incorporados dos niveles en dos lados contiguos.

Una base, formada por una plataforma del mismo tamaño y forma que la primera, sirve para apoyar el conjunto sobre los pies de la estructura (Figura 2). Esta base posee ocho anclajes. Cuatro de ellos están fijados a la cara inferior, situados sobre las esquinas del marco cuadrado, y formados por un tubo de 9 cm de largo y un diámetro de 2,5 centímetros que se insertarán en los cuatro pies de la estructura. Los otros cuatro anclajes se disponen en la cara superior del marco, situados en el centro de cada lado, formados por 4 tuercas soldadas al marco, en las que se enroscarán los tornillos de nivelación. La estructura se apoya mediante la base sobre cuatro pies telescópicos. Cada uno de ellos está formado por dos segmentos. El primer segmento está constituido por un tubo de 120 cm de longitud y 3 cm de diámetro. Sobre este tubo se fijó una tuerca soldada a 7 cm del extremo superior con un tornillo insertado. La parte trasera de dicho tornillo es plana para facilitar su manipulación manual sin necesidad de utilizar ninguna herramienta. Dicho tornillo sirve para fijar mediante presión el segmento a la base.

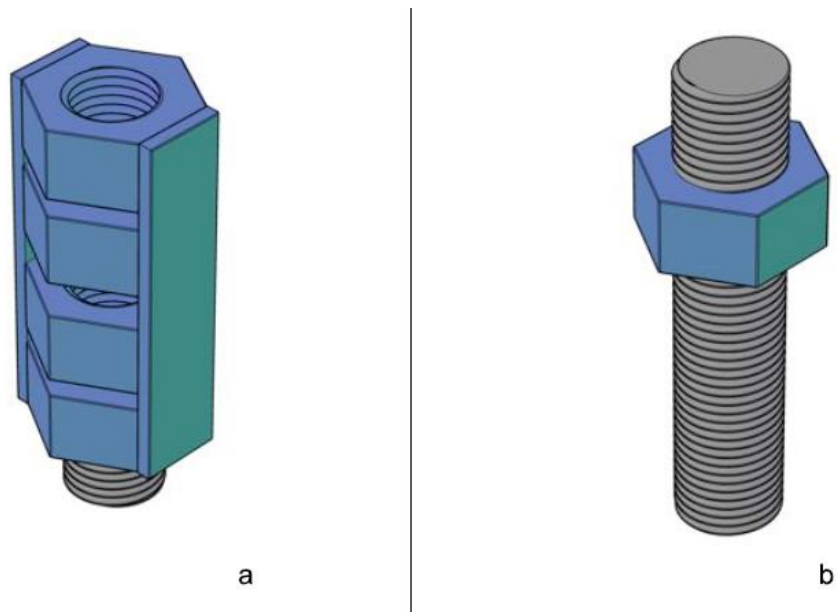


Figura 1. (a) Base del tornillo nivelador y (b) tornillo nivelador.

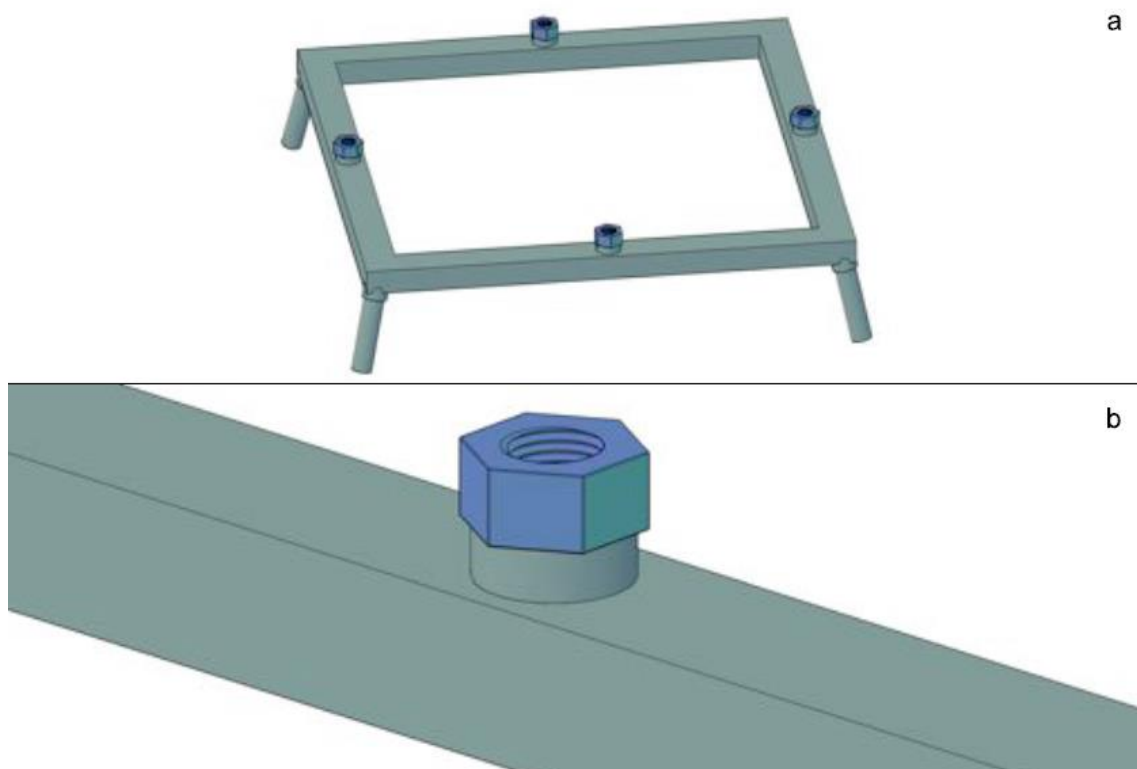


Figura 2. (a) Detalle de la plataforma inferior, mostrando el anclaje de los elementos niveladores y de los pies. (b) Detalle del punto de anclaje de los niveladores.

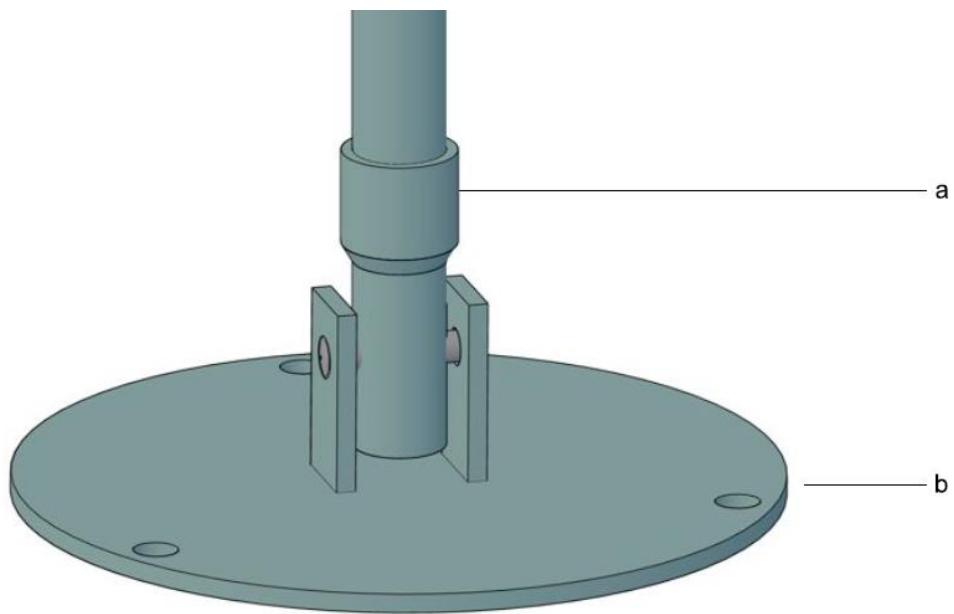


Figura 3. Base articulada y plana del pie. (a) extremo inferior del pie; (b) base de fijación al suelo.

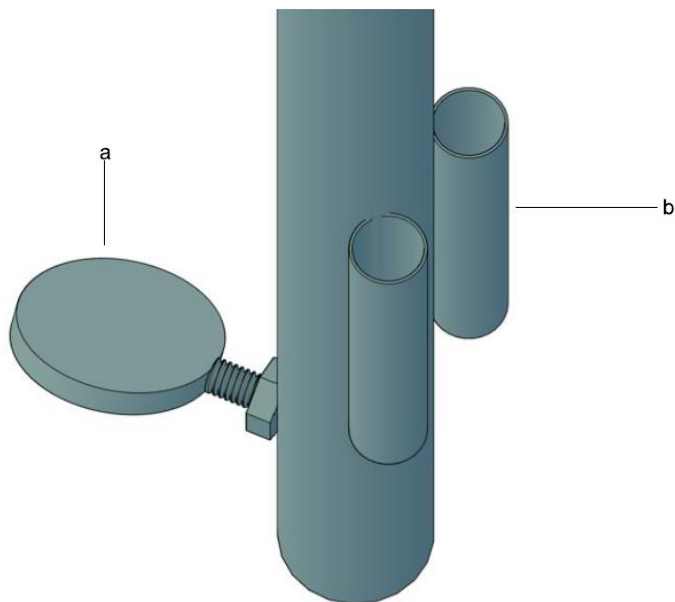


Figura 4. Detalle del tornillo de fijación (a) y anclajes laterales de la travesa (b).

En su parte inferior, este segundo tubo tiene soldados dos anclajes que permiten introducir dos traviesas para conectar entre sí los cuatro pies y evitar que se desplacen con el peso (Figura 4). Un poco más abajo se encuentra soldada otra tuerca con su correspondiente tornillo, similar al situado en la parte superior, que fijará el segundo segmento del pie, un tubo de 92 cm que lleva en su interior y que nos permitirá aumentar la altura de la base hasta un máximo de 200 cm. A su vez, el segundo segmento del pie incluye en su parte inferior una base articulada y plana de 10 cm de diámetro para conseguir una mejor adaptación al terreno e impedir su desplazamiento (Figura 3). Esta base plana está perforada (3 perforaciones de 6 mm) para permitir su fijación al suelo mediante clavos.

2.2 Impulsión de agua

El depósito de agua está formado (Figura 5) por dos piezas de metacrilato de 60 cm de lado con un grosor de 1 cm (cara superior) y otra de 60 cm de lado y 1.5 cm de alto (cara inferior) (Figura 6). La base inferior tiene en su parte interior 400 perforaciones de 1 mm de diámetro que forman una matriz cuadrada de 50 cm de lado y 20 perforaciones por lado. Dichas perforaciones están atravesadas por hilo de nylon formando un bucle de 1 cm para facilitar la formación de la gota y evitar un caudal continuo.

La cara inferior y la superior están unidas por una tercera pieza, un marco de 4 cm de ancho que permite dejar suficiente espacio entre las caras superior e inferior del depósito para albergar en su interior una lámina de agua que irá poco a poco saliendo por las perforaciones de la base. Por último, la cara superior está conectada a la entrada de agua, una válvula de purgado y un caudalímetro, de modo que el agua es inyectada desde la bomba de con la presión necesaria para que salga por las perforaciones de la base a la velocidad deseada. Estas tres partes quedan ensambladas mediante 20 tornillos con sus respectivas arandelas y tuercas, y selladas con dos cordones de silicona.

El agua es impulsada mediante una bomba de 12.0 V y 2500 g de peso, que proporciona un control de la presión entre 405.2 hasta 3140 kPa, desde un depósito de capacidad entre 25 y 100 L (en función de las necesidades del ensayo). Para controlar y regular el flujo de agua que llega al depósito y el equipo de goteo se utiliza un sensor de caudal para tuberías de 15 mm de diámetro. El caudalímetro se utiliza para controlar el caudal de agua que llega al depósito.

Para purgar el aire en el interior del circuito hidráulico se utiliza una válvula de purgado que se conecta al depósito a través de un tramo extensor de tubería de 10 cm de largo conectada a su vez con una pieza de conexión de latón en forma de T al depósito y a la tubería de entrada de agua. La Figura 7 muestra la estructura completa del simulador.

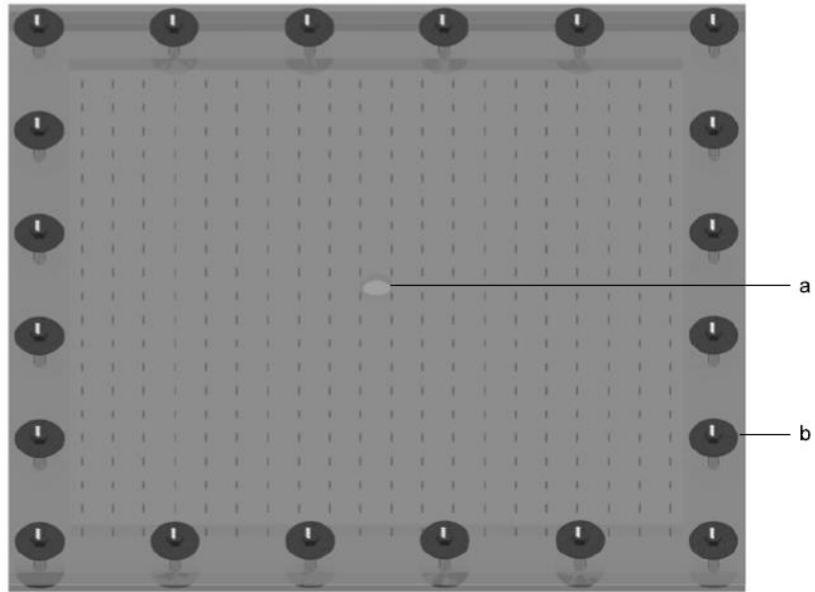


Figura 5. Detalle del depósito de agua. (a) entrada de agua por la cara superior; (b) tornillo de sujeción.

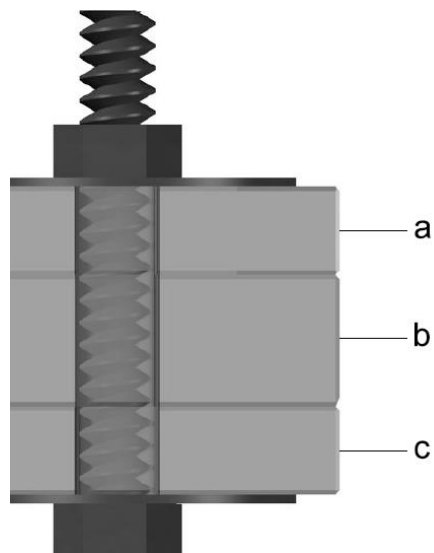


Figura 6. Sección de las piezas de metacrilato del depósito y el tornillo de sujeción. (a) base superior; (b) pared del depósito; (c) base inferior.



Figura 7. Vista completa de la estructura. (a) depósito de agua; (b) tornillos de nivelación; (c) base inferior; (d) patas telescópicas; (e) traviesas; (f) plataforma articulada de apoyo.

2.3 Control electrónico

Mediante un dispositivo de control electrónico se puede controlar y variar el caudal de entrada de agua al depósito según la intensidad de lluvia deseada. También permite controlar el tiempo de duración del ensayo.

2.3.1 Hardware

El *hardware* constituye la parte tangible del dispositivo, e incluye todos los componentes que lo forman y sus periféricos. Los principales elementos del *hardware* son una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo (plataforma Arduino), una pantalla de cristal líquido (LCD, por sus siglas en inglés) y un sistema para la entrada de datos.

La Figura 8 muestra el esquema eléctrico de la caja de control. De todos los componentes podemos llamar a tres de ellos como los principales o los más interesantes, que son; plataforma

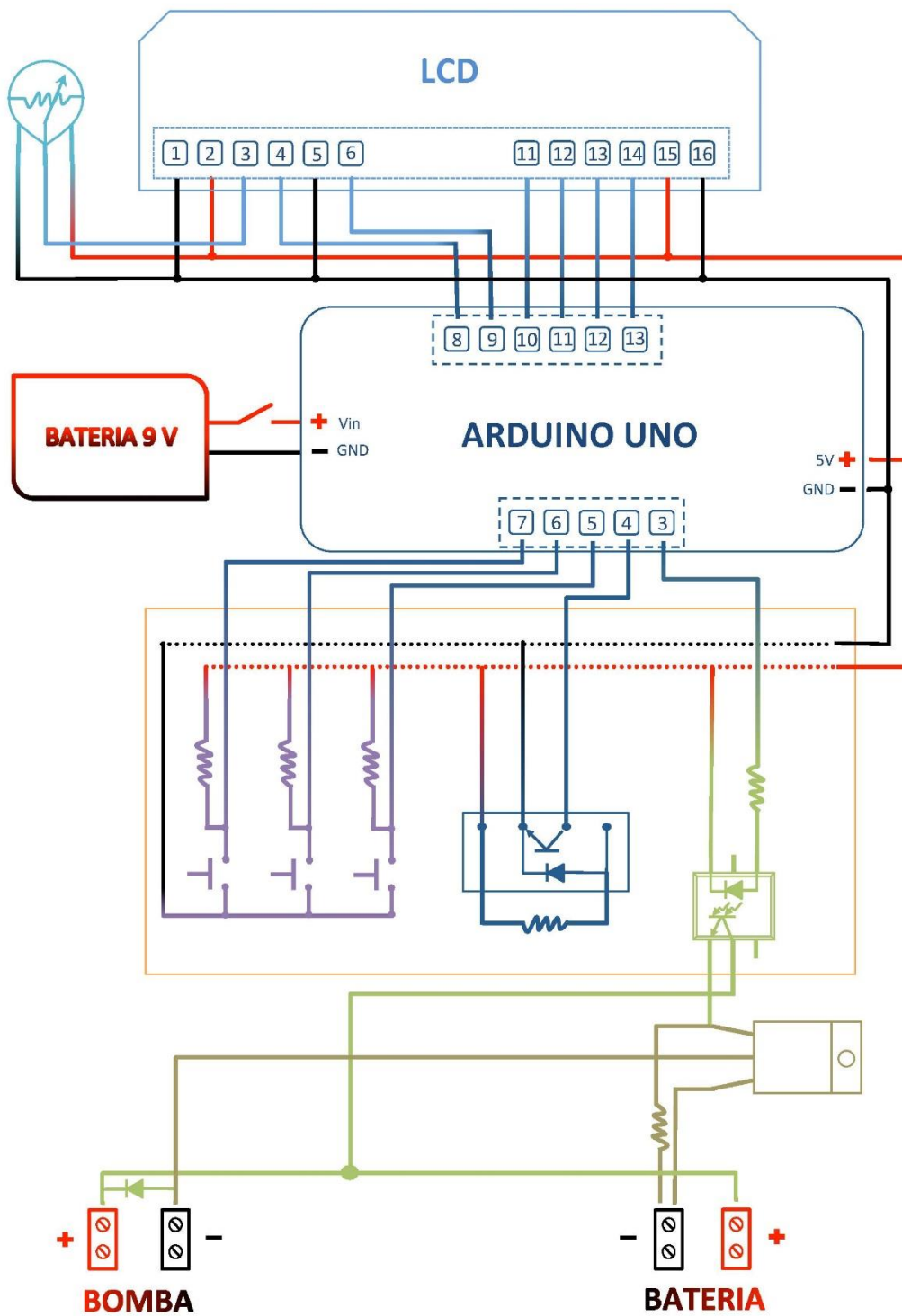


Figura 8. Esquema eléctrico de la caja de control del simulador de lluvia. LCD: pantalla de cristal líquido. ARDUINO UNO: microcontrolador. GND: polo negativo.

arduino, la pantalla LCD y un teclado. Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios. El proyecto Arduino se inició en el año 2005 como un proyecto para estudiantes en el Instituto IVREA, en Ivrea (Italia) con la idea de crear un entorno de hardware de bajo coste. Por aquella época, uno de los fundadores de Arduino, Massimo Banzi, daba clases en dicho instituto. El nombre del proyecto viene del nombre del Bar di Re Arduino (Bar del Rey Arduino) donde Massimo Banzi pasaba algunas horas. El hardware consiste en una placa con un microcontrolador Atmel AVR y puertos de entrada/salida. Los microcontroladores más usados son el Atmega168, Atmega328, Atmega1280, ATmega8 por su sencillez y bajo coste que permiten el desarrollo de múltiples diseños.

La placa Arduino permite el uso del *software* que controla la interfaz de datos (pantalla y teclado) y regula el funcionamiento de la bomba a partir de los registros del caudalímetro.

La pantalla LCD utilizada permite utilizar dos líneas de 16 caracteres y se utiliza para mostrar el menú de entrada de datos necesario para la simulación. Por último, un teclado simple de tres botones permite introducir los datos. Dos de los botones (CURSOR) están destinados a subir y bajar el valor de los parámetros. Un tercer botón (INTRO) es utilizado para confirmar o aceptar los datos o las opciones del menú.

La conexión entre el Arduino, la interfaz, un potenciómetro encargado de controlar la luminosidad de la pantalla LCD y un octoacoplador que recibirá la señal que enviará Arduino para activar o interrumpir el suministro de energía a la bomba y la señal del caudalímetro. La caja en la que se disponen todos los componentes también dispone de una batería de 9.0 V que alimentará al propio arduino y un interruptor que permitirá el paso de la alimentación de arduino. Un diodo colocado en la conexión a la alimentación del motor evitará la generación de corrientes inversas durante la parada del motor que puedan dañar los elementos de la placa.

Todos estos elementos, junto al cableado, una batería (9.0 V) y un transistor como interruptor electrónico de la bomba, están contenidos en una caja de PVC de 19 cm de alto por 12 cm de ancho, con un fondo de 6 cm, diseñada genéricamente para albergar componentes eléctricos, que sirve para dar soporte a todos los elementos y disponer a la vista la pantalla LCD y el teclado. Como este simulador se ha diseñado para su uso en campo, esta caja resguardará a los elementos de agentes externos que puedan dañarlos o alterar su funcionamiento.

Por último, existen 3 conexiones de la caja al exterior. La conexión A esta dispuesta para conectar el caudalímetro. Las conexiones B y C sirven para conectar los cables de la bomba y de la fuente de alimentación de 12.0 V (dos cables por cada elemento con su correspondiente

polaridad). El equipo está adaptado para ser alimentado desde una batería externa o desde una batería de automóvil directamente.

2.3.2 Software

Lenguaje de programación

El *software* está constituido por el programa que lleva el controlador (arduino) y que nos va a permitir manejar la pantalla, los botones, tomar datos del caudalímetro, encender o apagar la bomba y medir los tiempos de ensayo.

El *software* consiste en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje de programación *Processing/Wiring*, que se caracteriza por su simplicidad, ya que consta de una serie de librerías que contienen comandos para las diferentes acciones que una quiera realizar. y el cargador de arranque que es ejecutado en la placa. El entorno de desarrollo integrado es libre y se puede descargar gratuitamente (<http://arduino.cc>). La plataforma Arduino se programa mediante el uso de un lenguaje propio basado en el lenguaje de programación de alto nivel, *Processing*. Sin embargo, es posible utilizar otros lenguajes de programación y aplicaciones populares en Arduino, debido a que Arduino usa la transmisión serial de datos soportada por la mayoría de los lenguajes mencionados. Para el *software* que no soporte el formato serie de forma nativa, es posible utilizar *software* intermediario que traduzca los mensajes enviados por ambas partes para permitir una comunicación fluida.

Menú de trabajo

El programa que se ha utilizado para programar el controlador es el propio de esta plataforma. El *software* elaborado bajo este lenguaje lleva a cabo, por este orden, los siguientes pasos:

1. Encendido de la pantalla LCD.
2. Se muestra un mensaje de bienvenida "ARLOAN 2.0", y pasa automáticamente al primer menú.
3. En el primer menú se selecciona la intensidad de lluvia deseada para la simulación haciendo uso del CURSOR para aumentar o disminuir dicho valor.
4. Pulsando INTRO, se pasa al segundo menú, en el que podremos indicar el tiempo que durará la simulación.
5. Pulsando CURSOR ARRIBA se regresa al punto 3.
6. Pulsando INTRO de nuevo, comienza la simulación, mostrando una cuenta atrás de tiempo hasta el fin del período de simulación.

Tabla 1. Secuencia de menú del programa de control.

Mensaje	Interpretación	Opciones
ARLOAN 2.0 @MED_Soil	Encendido del equipo y mensaje de bienvenida.	
Intensidad de lluvia	Muestra la opción de intensidad de lluvia a seleccionar con un valor de partida y sus unidades (por ejemplo, 85 L m ⁻²).	Presionando los cursores seleccionaremos la intensidad de lluvia deseada expresada en L m ⁻² . Presionaremos INTRO para aceptar y continuar con la siguiente opción.
Tiempo	Muestra la opción de tiempo a seleccionar con un valor de partida y sus unidades (por ejemplo, 5 min).	Presionando los botones del CURSOR (ARRIBA o ABAJO) seleccionaremos el tiempo deseado expresado en minutos. Presionaremos INTRO para aceptar y continuar con la siguiente opción.
Int=XXX mm h ⁻¹ T=XXX min	El programa muestra los datos seleccionados (intensidad de lluvia, en mm h ⁻¹ y tiempo, en minutos) anteriormente para verificar que son correctos.	Pulsando INTRO se aceptan los parámetros seleccionados y comienza la simulación. Pulsando ARRIBA se vuelve al menú de entrada de datos.
Int=XXX mm h ⁻¹ Espera=XXX s	Intensidad de lluvia seleccionada (mm h ⁻¹) y tiempo de duración restante del ensayo (s).	
Tiempo finalizado	Fin de la simulación.	

La Tabla 1 muestra la secuencia de menú del programa de control que se muestra en pantalla. El programa se ha configurado para que mida continuamente la señal generada por el caudalímetro, de modo que pueda variar la anchura del pulso que controla la bomba para regular la cantidad de agua necesaria y se mantenga el caudal seleccionado en el menú.

Programa

El *software* proporciona las instrucciones necesarias en lenguaje de programación que instruye al microcontrolador para que ejecute los pasos del experimento, haciendo los cálculos pertinentes y opere según los resultados de dichos cálculos con los parámetros del experimento que se han establecido previamente. Para una mejor comprensión de este apartado es preciso definir algunos conceptos que ayuden a entender el programa.

Se define como frecuencia la magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico (Giancoli, 2006). Para calcular la frecuencia de un suceso, se contabiliza el número de ocurrencias de este suceso en un intervalo temporal y luego se divide este número entre el tiempo transcurrido.

La modulación por ancho de pulsos o *pulse width modulation* (PWM, a partir de sus siglas en inglés) es la técnica por la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica, bien para transmitir información o para controlar la cantidad de energía que se envía. Esta técnica es

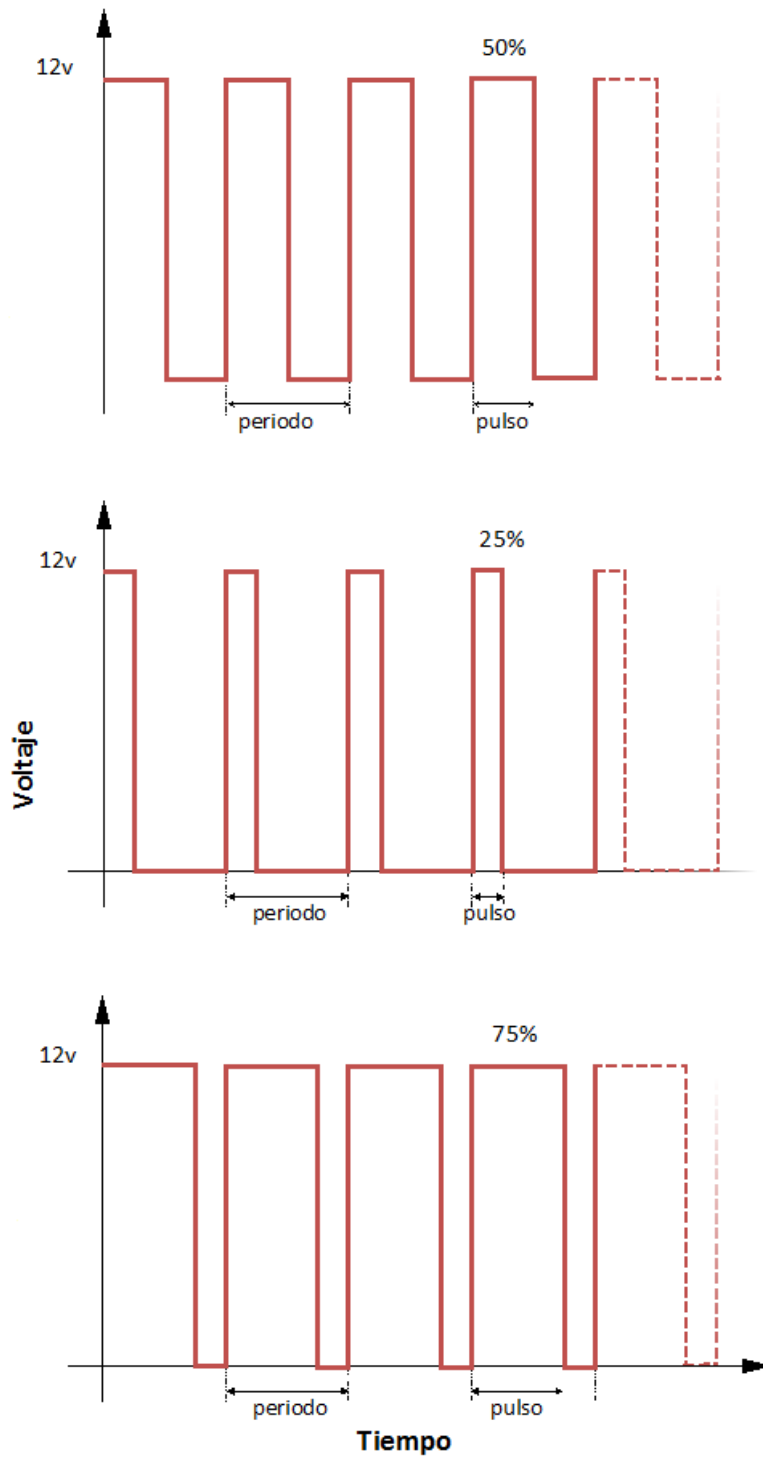


Figura 9. Representación gráfica de la modulación por ancho de pulsos al 50, 25 y 75%

utilizada para regular la velocidad de giro en motores eléctricos. La Figura 9 representa la modulación por ancho de pulso al 50, 25 y 75%, siendo el periodo el mismo y el pulso el tiempo en el cual el voltaje está activo, dado que sólo existen dos voltajes posibles, 12.0 o 0.0 V, y sólo modificamos el intervalo de tiempo durante el que está encendido por pulso. De esta manera, podemos controlar la potencia de la bomba. Si en lugar de utilizar esta técnica, tratásemos de regularla a través de la intensidad de alimentación de la bomba, esta no tendría un comportamiento predecible, ya que el fabricante recomienda trabajar con su intensidad, y cualquier variación de esta podría implicar un mal funcionamiento.

El programa está organizado de manera que se definen una serie de variables necesarias para la ejecución. El primer paso es mostrar en la pantalla LCD un título para verificar que se ha arrancado correctamente y que se procede a ejecutar el programa. A continuación, se muestra el menú INTENSIDAD DE LLUVIA. En él vamos a poder seleccionar la intensidad de lluvia que deseamos para nuestra simulación partiendo de valor predeterminado de 85 mm h^{-1} . A partir de aquí podremos ir aumentando ese caudal o disminuyéndolo utilizando el teclado hasta llegar a la intensidad deseada. Una vez conseguido, se accede al siguiente menú (TIEMPO) pulsando la tecla INTRO. En este menú se muestra como valor predeterminado un tiempo de 5 min pudiendo variar o disminuir este tiempo haciendo uso de los botones ARRIBA o ABAJO hasta seleccionar el valor deseado. En este momento, el menú muestra los valores seleccionados. Si es necesario corregirlos, pulsando CURSOR ARRIBA se regresa al menú INTENSIDAD DE LLUVIA. Si son correctos, debe pulsarse INTRO para acceder al siguiente menú. A partir de aquí se va a iniciar una PWM a una frecuencia de 500 Hz que va a transmitirse a la bomba para indicar el porcentaje de pulso con valor 1 o 0. De esta manera, la bomba no va a ser controlada mediante variación del voltaje, sino por medio de una repetición de puesta en marcha y parada del mecanismo a voltaje máximo. Este proceso sucede a una velocidad tan elevada respecto al tiempo de respuesta de la bomba que las interrupciones no son apreciables. En este momento, el programa mide los datos que provienen del caudalímetro y según eso, calculará el PWM que transmite a la bomba para que el caudal sea el adecuado para la intensidad de lluvia seleccionada. Para llegar a controlar este proceso, se ha partido de una serie de datos teóricos y ajustes que nos indican cuántos pulsos del caudalímetro van a determinar el paso de un valor determinado de litros de agua. Las especificaciones técnicas del caudalímetro dan como valor aproximado 4600 pulsos por litro. Según esto, y la intensidad de lluvia seleccionada para la simulación, el programa va a comparar los datos que obtiene del caudalímetro con el valor teórico que se le ha indicado. En esta comparación, pueden suceder tres resultados: [i] que la frecuencia del caudalímetro sea

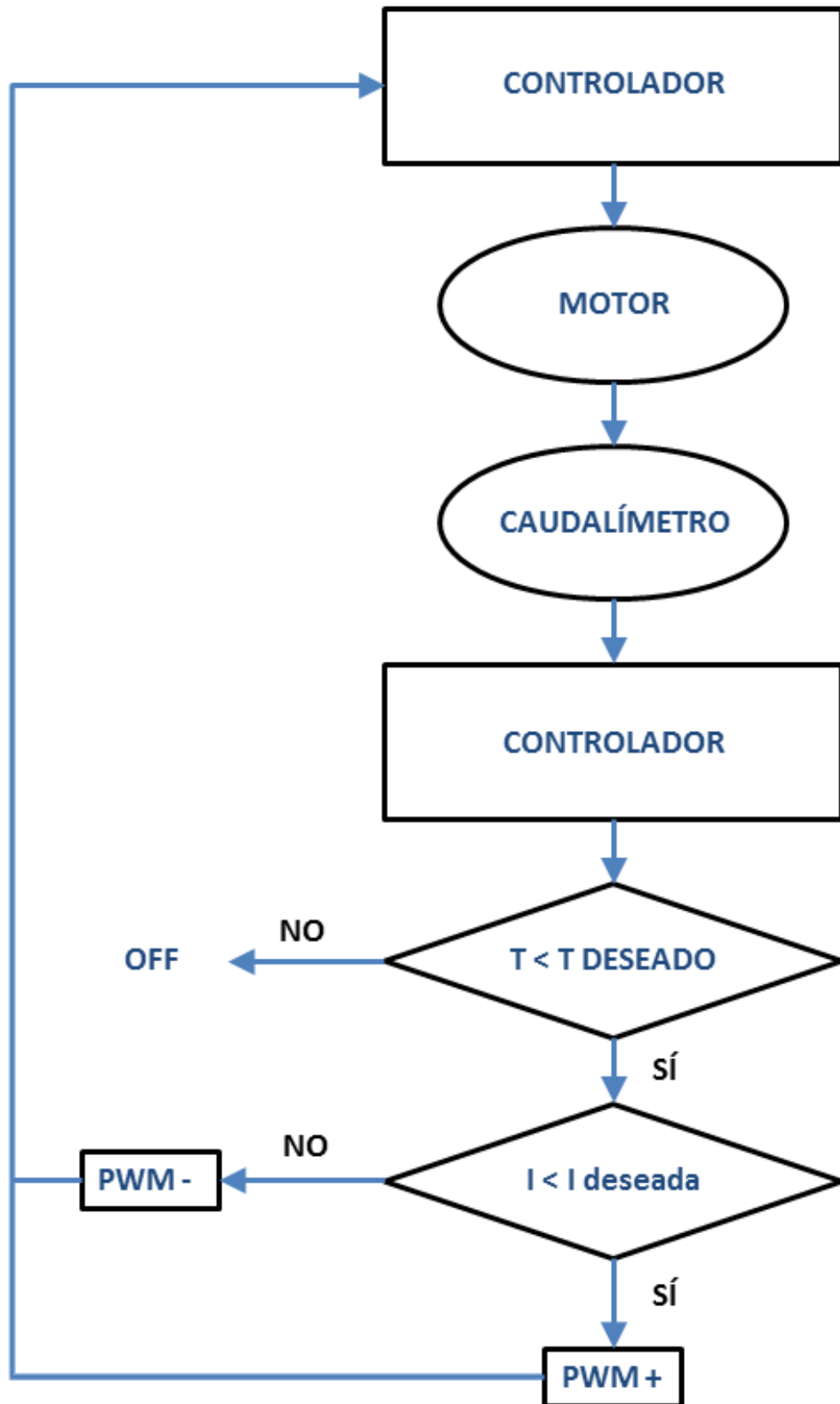


Figura 10. Diagrama de flujo de trabajo.

igual, [ii] mayor o [iii] menor que la deseada. En caso de que el valor de la frecuencia medida sea mayor o menor que el valor deseado, el programa aumentará o disminuirá, respectivamente, el valor del ancho de pulso que envía a la bomba. En caso de que el valor deseado del caudalímetro sea igual que el valor medido el programa no lo tomará como un valor válido y no reaccionará ante este resultado, mantendrá el PWM y continuará midiendo hasta obtener un valor diferente al seleccionado. De este modo, el PWM se ajusta continuamente. El PWM que proporciona la intensidad deseada no se toma como válido, para que el programa siga midiendo y calculando para evitar fluctuaciones que se pueden deber a presión, temperatura del agua u otras variables. De esta manera, nos aseguramos que el programa esté en todo momento controlando el valor de la intensidad de lluvia producida.

De forma paralela, el programa mide el tiempo de simulación tomando como referencia el reloj interno del sistema, comparándolo con el tiempo de simulación seleccionado. Cuando ambos tiempos sean iguales, el programa finaliza y suspende la alimentación a la bomba. Una vez llegado este punto el programa se reiniciará, estará disponible para que se le vuelva a seleccionar nuevos caudales y tiempos para realizar una nueva simulación.

2.4 Montaje

Una vez elegido el punto de ensayo, se comienza por montar la estructura. Para ello se colocan los cuatros pies del simulador y la plataforma inferior, uniéndolos entre sí, fijándolos con sus tornillos de presión. Una vez hecho esto, colocaremos las cuatro traviesas que unen estos pies entre sí para mantener la distancia entre los mismos. Posteriormente, se ajustan los tornillos de nivelación a esta base mediante la rosca definida para tal efecto.

Antes de comenzar el ensayo hay que llenar el depósito de agua (de esta forma, los ensayos son siempre realizados en las mismas condiciones). Para ello, se colocará el caudalímetro en la toma de agua del depósito y lo conectaremos entre el depósito y la bomba. Posteriormente, se conecta la entrada de agua a la bomba con el depósito externo de agua. Una vez conectado el sistema hidráulico, se realizan las conexiones de la parte electrónica del simulador. El caudalímetro se conecta a la caja de control mediante una clavija de cuatro pines. Después, se conectan los polos positivo y negativo de la bomba a la caja de control.

El depósito equipado con el sistema de goteros se coloca sobre la plataforma superior y se nivela para que quede perfectamente horizontal, girando los tornillos en el sentido adecuado y utilizando como referencia los niveles de burbuja. Para alimentar eléctricamente la bomba, se conectan los polos de la batería a la caja de control a las entradas de que dispone la caja de control. En este momento se puede encender el simulador.

3 Especificaciones técnicas

La Tabla 2 muestra el resumen de las especificaciones técnicas del simulador ARLOAN.

Tabla 2. Especificaciones técnicas.

Dimensiones del depósito con sistema de goteo	Dimensiones: 35 mm × 600 mm × 600 mm
Capilar	Número de capilares: 400 Longitud: 10 mm Diámetro: 1 mm Diámetro de hilo: 0.5 mm
Recipiente colector	Capacidad: 2 L
Magnitud de la lluvia simulada	Ilimitada
Duración de la simulación	60 min
Intensidad de lluvia simulada	100-1900 mm h ⁻¹
Altura de caída de gota	1280-2000 mm
Diámetro medio de gota ± DS	7.1 ± 1.4 mm
Volumen medio de gota ± DS	204.0 ± 113.4 mm ³
Masa media de gota ± DS	0.2 ± 0.1 g
Velocidad en el impacto (calculada para una altura de 200 cm)	6.3 m s ⁻¹
Energía cinética media en el impacto ± DS (calculada para una altura de 200 cm)	4.0 ± 2.2 mJ
Pendiente máxima	70%
Superficie de lluvia	500 mm × 500 mm
Superficie de ensayo	400 mm × 400 mm

Referencias

- Abudi I, Carmi G, Berliner P. 2012. Rainfall simulator for field runoff studies. *Journal of Hydrology* 454-455: 76-81.
- Adams JE, Kirkham D, Nielsen DR. 1957. A portable rainfall-simulator infiltrometer and physical measurements of soil in place. *Soil Science Society of America Proceedings* 21: 473-477.
- Agassi M, Bradford JM. 1999. Methodologies for interrill soil erosion studies. *Soil & Tillage Research* 49: 277-287.
- Amerman CR, Hillel DI, Peterson AE. 1970. A variable-intensity sprinkling infiltrometer. *Soil Science Society of America Proceedings* 34: 830-832.
- Arnaez J, Lasanta T, Ruiz-Flaño P, Ortigosa L. 2007. Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vineyards. *Soil & Tillage Research* 93: 324-334.
- Asseline J, Valentin C. 1978. Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cahiers ORSTOM, série Hydrologie* XV: 321-349.
- Barros AP, Prat OP, Shrestha P, Testik FY, Bliven LF. 2008. Revisiting low and list (1982): evaluation of raindrop collision parameterizations using laboratory observations and modeling. *Journal of Atmospheric Sciences* 65: 2983-2993
- Benito E, de Blas E, Santiago JL, Varela ME. 2001. Descripción y puesta a punto de un simulador de lluvia de campo para estudios de escorrentía superficial y erosión del suelo. *Cuadernos do Laboratorio Xeoloxico de Laxe* 26: 211-220.
- Beutner EL, Gaebe RR, Horton RE. 1940. Sprinkled-plot runoff and infiltration experiments on Arizona desert soils. *Transactions of the American Geophysical Union* 21: 550-558.
- Blackburn WH, Meeuwing RO, Skau CM. 1974. A mobile infiltrometer for use on rangeland. *Journal of Range Management* 27: 322-323.
- Bowyer-Bower TAS, Burt TP. 1989. Rainfall simulators for investigating soil response to rainfall. *Soil Technology* 2: 1-16.
- Brakensiek PO, Rawls WJ, Hamon WR. 1979. Application of an infiltrometer system for describing infiltration into soils. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 22: 320-325.
- Bowyer-Bower T, Burt T. 1989. Rainfall simulators for investigating soil response to rainfall. *Soil Technology* 2: 1-16.
- Bubbenzer GD, Jones BA. 1971. Drop size and impact velocity effects on the detachment of soils under simulated rainfall. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 14: 625-628.
- Bubbenzer GD, Meyer LD. 1965. Simulation of rainfall and soils for laboratory research. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 8.: 73-75.
- Bubbenzer GD, Molnau M, McCool DK. 1979. Palouse rainfall simulator. *Proceedings of the Rainfall Simulator Workshop 1978*. United States Department of Agriculture, Science and Education Administration Agricultural Reviews and Manuals, ARS-W-10/july 1979. Tucson, AZ. Pp.: 131-133.
- Calvo A, Gisbert B, Palau E, Romero M. 1988. Un simulador de lluvia portátil de fácil construcción. En: Sala M., Gallart F. (Eds.), *Métodos y técnicas para la medición de procesos geomorfológicos*, Sociedad Española de Geomorfología, Monografía 1, Zaragoza. Pp. 6-15.
- Cerdà A. 1999. Simuladores de lluvia y su aplicación a la geomorfología. Estado de la cuestión. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 25:45-84.
- Cerdà A, Marcos E, Llovet J, Benito E, Pérez-Cabello F, Úbeda X, Jordán A, Zavala LM, Ruiz-Sinoga JD. 2010. La lluvia simulada como herramienta para la investigación del efecto de los incendios forestales sobre los suelos. En: Cerdà A, Jordán A (Eds.), *Actualización en métodos y técnicas para el estudio de los suelos afectados por incendios forestales*. FUEGORED – Càtedra de Divulgació de la Ciència – Universitat de València. Valencia.

- Chow VT, Yen BC. 1974. A laboratory watershed experimentation system. Hydr. Engr. Series nº 27, Civil Engineering Department, University of Illinois. Springfield, IL.
- Christiansen JE. 1941. The uniformity of application of water by sprinkler system. *Agricultural Engineering* 22: 89-92.
- Daba Fufa S, Strauss P, Schneider W. 2002. Comparison of erodibility of somehararghe soils using rainfall simulation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 33: 333-348.
- Epema GF, Riezebos HTh. 1983. Fall velocity of waterdrops at different heights as a factor influencing erosivity of simulated rain. En: J. De Ploey (Ed.), *Rainfall simulation, runoff and soil erosion, Catena supplement* 4: 1-17.
- Foster GR, Eppert FP, Meyer LD. 1979. A programmable rainfall simulator for field plots. *Proceedings of the Rainfall Simulator Workshop 1978*. United States Department of Agriculture, Science and Education Administration *Agricultural Reviews and Manuals*, ARS-W-10/july 1979. Tucson, AZ. Pp.: 45-63.
- Foster IDL, Fullen MA, Brandsma RE, Chapman AS. 2000. Drip-screen rainfall simulators for hydro- and pedo-geomorphological research: the Coventry experience. *Earth Surface Processes and Landforms* 25: 691-707.
- Gil J, Parras L, Alcalá R, Gil D. 2007. Evaluación de la erosión hídrica mediante lluvia simulada en suelos de Sierra Morena. En: Bellinfante N, Jordán A (Eds), *Tendencias actuales de la ciencia del suelo*. Universidad de Sevilla. Sevilla
- Hignett CT, Gusli S, Cass A, Besz . 1995. An automated laboratory rainfall simulation system with controlled rainfall intensity, raindrop energy and soil drainage. *Soil Technology* 8: 31-42
- Hino M, Fujita K, Shutto H. 1987. A laboratory experiment on the role of grass for infiltration and runoff processes. *Journal of Hydrology* 90: 303-325.
- Hino M, Odaka Y, Nadaoka K, Sato A. 1988. Effect of initial soil moisture content on the vertical infiltration process-a guide to the problem of runoff-ratio and loss. *Journal of Hydrology* 102: 267-284.
- Holtan HN. 1961. A concept of infiltration estimates in watershed engineering. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-41-51. Washington DC.
- Holtan HN, Kirkpatrick MH. 1950. Rainfall infiltration and hydraulics of flow in runoff computations. *Transactions of the American Geophysical Union* 31: 771-779.
- Horton RE. 1939. Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration capacity. *Transactions of the American Geophysical Union* 20: 693-711.
- Ibañez S, Moreno H, Gisbert JM. 2012. El uso de un simulador de lluvia. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.
- Imeson AC, Kwaad FJPM, Verstraten JM. 1982. The relationship of soil physical and chemical properties to the development of badlands in Morocco. En: R.B. Bryan y A. Yair (Eds.), En: R. Bryan y A. Yair (Eds.), *Badland Geomorphology and Piping*. Geo Books. Norwich. Pp.: 47-70.
- Iserloh T, Fister W, Seeger M, Willger H, Ries JB. 2012. A small portable rainfall simulator for reproducible experiments on soil erosion. *Soil & Tillage Research* 124: 131-137.
- Iserloh T, Ries J B, Arnáez J, Boix-fayos C, Butzen V, Cerdá A, Echeverría M T, Fernández-Gálvez J, Fister W, Geibler C, Gómez J A, Gómez-Macpherson H, Kuhn N J, Lázaro R, León F J, Martínez-Mena M, Martínez-Murillo J F, Marzen M, Mingorance M D, Ortigosa L, Peters P, Regüés D, Ruiz-Sinoga J D, Scholten T, Seeger M, Solé-Benet, Wengel R, Wirtz S., 2013. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. *Catena* 110: 100-112.
- Izzard CF. 1944. The surface profile of overland flow. *Transactions of the American Geophysical Union. Papers Hydrology* 693-711.
- Jin K, Cornelis WM, Schiettecatte W, Lu JJ, Cai DX, Jin JY, De Neve S, Hartmann R, Gabriels D. 2009. Effects of different soil management practices on total P and Olsen-P sediment loss: A field rainfall simulation study. *Catena* 78:72-80.

- Kamphorst A. 1987. A small rainfall simulator for determination of soil erodibility. *Netherlands Journal of Agricultural Soil Science* 35: 407-415.
- Kleijn WB, Oster JD, Cook N. 1979. A rainfall simulator with nonrepetitious movement of drop outlets. *Soil Science Society of America Journal* 46: 93-99.
- Lane LJ. 1986. Erosion on rangelands: emerging technology and data base. *Proceedings of the Rainfall Simulator Workshop 1985*. United States Department of Agriculture, Science and Education Administration Agricultural Reviews and Manuals, ARS-W-10/july 1979. Tucson, AZ.
- Laws JO. 1941. Measurement of the fall-velocity of water drops and rain drops. *Transactions of the American Geophysical Union* 22: 709-721.
- Laws JO, Parsons DA. 1943. The relationship of raindrop size to intensity. *Transactions of the American Geophysical Union* 24: 452-460.
- Le Bissonnais Y, Cerdan O, Lecomte V, Benkhadra H, Souchère V, Martin P. 2005. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *Catena* 62:111-124
- Marston D. 1982. A rainfall simulator for field determination of relative erosion potentials. *Journal of the Soil Conservation Service of New South Wales* 38: 31-39.
- Martínez-Zavala L, Jordán A. 2008. Effect of rock fragment cover on interrill soil erosion from bare soils in Western Andalusia, Spain. *Soil Use and Management* 24: 108-117.
- McQueen IS. 1963. Development of a hand portable rainfall-simulator infiltrometer. *United States Geological Survey Circular* 482.
- Meyer LD. 1960. Use of the rainulator for runoff plot research. *Soil Science Society of America Proceedings* 24: 319-22.
- Meyer LD. 1988. Rainfall simulator for soil conservation research. En: Lal R (Ed.), *Soil erosion research methods*. Soil & Water Conservation Society. Ankeny, IA.
- Meyer LD. 1994. Rainfall simulators for soil erosion research. En: R. Lal (Ed.), *Soil erosion research methods*. Soil and Water Conservation Society and St. Lucie Press. Ankeny, IA.
- Meyer LD, Harmon WC. 1979. Rainfall simulator for evaluating erosion rates and sediment sizes for row sideslopes. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 22: 100-103.
- Meyer LD, McCune DL. 1958. Rainfall simulator for runoff plots. *Agricultural engineering* 39: 644-648.
- Morin J, Goldberg D, Seginer I. 1967. A rainfall simulator with rotating disk. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 10: 74-79.
- Munn JR, Huntington GL. 1967. A portable simulator for erodibility and infiltration measurements on ruggedze characteristics of sediment from agricultural soils. *Journal of Soil and Water Conservation* 47: 107-111.
- Mutchler CK, Hersmeier LF. 1965. A review of rainfall simulators. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 6: 220-222.
- Navas A, Alberto EF, Machín J, Galán A. 1990. Design and operation of a rainfall simulator for field studies of runoff and soil erosion. *Soil Technology* 3: 385-397.
- Neal JH. 1938. The effect of the degree of slope and rainfall characteristics on runoff and soil erosion. *University of Missouri Agricultural Experiment Station Research Bulletin* 280.
- Neibling WH, Foster GR, Natterman RA, Nowlin JD, Holbert PV. 1981. Laboratory and field testing of a programmable plot-sized rainfall simulator. *Erosion and sediment transport measurement*. International Association of Hydrological Sciences Publication 133: 405-414.
- Nichols ML, Sexton HD. 1932. A method of studing soil erosion. *Agricultural Engineering* 13: 101-103.
- Nolan SC, van Vliet LJP, Goddard TW, Flesch TK. 1997. Estimating storm erosion with rainfall simulator. *Canadian Journal of Soil Science* 77: 669-676.
- Poesen J. 1984. The influence of slope angle on infiltration rate and hortonian overland flow volume. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F. Supplement Band* 49: 117-131.

- Sánchez I, Asseline J. 1999. Simuladores. En: Sánchez I, Stone J, Jasso R, (Eds.), *Uso de lluvia artificial para parametrizar modelos de procesos hidrológicos*, México DF. Pp.: 27-56.
- Seeger M. 2007. Uncertainty of factors determining runoff and erosion processes as quantified by rainfall simulations. *Catena* 17: 56-67.
- Selkirk JM, Riley SJ. 1996. Erodibility of road batters under simulated rainfall. *Hydrological Sciences –Journal- des Sciences Hydrologiques* 41: 363-376.
- Schindler-Wildhaber Y, Banninger D, Burri K, Alewell Ch. 2012. Evaluation and application of a portable rainfall simulator on subalpine grassland. *Catena* 91:56-62.
- Spilhaus A F. 1948. Drop size, intensity, and radar echo of rain. *Journal of Metereology* 5: 161-164.
- Wischmeier WH, Smith DD. 1978. Predicting rainfall erosion losses. United States Department of Agriculture, Agriculture Handbook 537. Science and Education Administration. Washington, DC.

Lista de figuras y tablas

Figuras

<i>Figura 1. (a) Base del tornillo nivelador y (b) tornillo nivelador.</i>	22
<i>Figura 2. (a) Detalle de la plataforma inferior, mostrando el anclaje de los elementos niveladores y de los pies. (b) Detalle del punto de anclaje de los niveladores.</i>	22
<i>Figura 3. Base articulada y plana del pie. (a) extremo inferior del pie; (b) base de fijación al suelo.</i>	23
<i>Figura 4. Detalle del tornillo de fijación (a) y anclajes laterales de la traviesa (b).</i>	23
<i>Figura 5. Detalle del depósito de agua. (a) entrada de agua por la cara superior; (b) tornillo de sujeción.</i>	25
<i>Figura 6. Sección de las piezas de metacrilato del depósito y el tornillo de sujeción. (a) base superior; (b) pared del depósito; (c) base inferior.</i>	25
<i>Figura 7. Vista completa de la estructura. (a) depósito de agua; (b) tornillos de nivelación; (c) base inferior; (d) patas telescópicas; (e) traviesas; (f) plataforma articulada de apoyo.</i>	26
<i>Figura 8. Esquema eléctrico de la caja de control del simulador de lluvia. LCD: pantalla de cristal líquido. ARDUINO UNO: microcontrolador. GND: polo negativo.</i>	27
<i>Figura 9. Representación gráfica de la modulación por ancho de pulsos al 50, 25 y 75%</i>	31
<i>Figura 10. Diagrama de flujo de trabajo.</i>	33

Tablas

<i>Tabla 1. Secuencia de menú del programa de control.</i>	30
<i>Tabla 2. Especificaciones técnicas.</i>	35

Anexo 1. Presupuesto

Bloque	Unidades	Concepto	Descripción	Precio unitario (€)	Descuento (€)	Precio total (€)
Estructura	1	Estructura	Estructura en acero con tratamiento galvanizado	356.23		356.23
	1	Tornillos	Varilla roscada para tornillos de nivelación	5.67		5.67
	40	Tuercas	Tuercas DIN 934c.8M-20 para los tornillos de nivelación	0.30		12.00
	1	Mano de obra	Mano de obra especializada para la realización de los tornillos de nivelación	24.20		24.20
	1	Mano de obra	Realización del marco y la canaleta para la recogida de sedimentos	105.00		105.00
			Subtotal Bloque Estructura			503.10
	2	Metacrilato	Placas de metacrilato incoloro de 600 × 600 × 10 mm sin pulir	57.79		115.58
	1	Metacrilato	Placa de metacrilato incoloro de 600 × 600 × 20 mm, taladrada	134.51		134.51
	1	Válvula de purgado	Válvula de purgado de aire para el cabezal hidráulico	12.50		12.50
	1	Bomba	Bomba (12.0 V)	89.00		89.00
	1	Caudalímetro	Medidor de caudal	32.15		32.15
	1	Depósito de agua	Depósito de plástico de 25 L de capacidad	9.55		9.55
	1	Manguera	Manguera (15 mm de diámetro y 15 m de longitud)	10.25		10.25
	4	Conectores	Conectores rápidos de mangueras	1.55		6.20
	1	Extensor	Tubería de 10 cm para tubería de 15mm	2.45		2.45
	1	Conexión "T"	Conexión en "T" cabezal con válvula de purgado	1.75		1.75
			Subtotal Bloque Hidráulica			413.95
Electrónica	20	Kit de conexión de cables	Kit de conexión de cables	0.07	30.00	1.00
	1	Cable	Cable de conexión, Cc1252v verde	2.46	30.00	1.72
	1	LCD	Display LCD, 2 líneas de 16 caracteres	11.10	30.00	7.77
	1	Spray CRC	Spray limpiador de contacto, CRC CO contact 200 mL (33% extra)	5.74	15.00	4.88
	1	Placa	Placa Bungard CPC102 80 × 100 cuadros	2.12		2.12
	1	Caja serie 70	Caja de PVC, 190 mm × 120 mm × 160 mm	8.87		8.87
	1	Tornillos de fijación	Tornillos de fijación a placa DIN84. Bolsa de 25 unidades	1.09		1.09

Bloque	Unidades	Concepto	Descripción	Precio unitario (€)	Descuento (€)	Precio total (€)
	12	Separador de placa	Separadores de placa, CI 12.7 mm, adhesivo	0.15		1.80
	1	Conmutador	Conmutador deslizante	0.08		0.08
	1	Diodo	Diodo P1000M 10 A 1000 V	0.33		0.33
	6	Cajetín de conexiones	Cajetín modular II 2V	0.08		0.48
	3	Cajetín de conexiones	Cajetín modular II 4V	0.08		0.24
	1	Barra macho	Barra macho 1 × 40, recta dorada	0.18		0.18
	2	Conexiones	Kit conexiones cables M/M (10 unidades)	2.50		5.00
	1	Conector Micro	Conector micro 4P M base	0.42		0.42
	1	Conector Micro	Conector micro 4P M aereo	0.56		0.56
	1	Plataforma Arduino	Plataforma Arduino Modelo UNO	32.90		32.90
	1	Transistor		2.19		2.19
	6	Resistencias	Resistencias varias	0.11		0.66
			Subtotal Bloque Electrónica			72.29
			Total			989.34

Anexo 2. Programa

```
#include <LiquidCrystal.h> //Carga de librerias
#include <EEPROM.h>
// Define los pines de la LCD
LiquidCrystal lcd(8, 9, 10, 11, 12, 13);

//Define los botones, caudalimetro y bomba
const int boton1 = 7; // Arriba
const int boton2 = 6; // Abajo
const int boton3 = 5; // INTRO
const int caudalimetro = 4;
const int bomba = 3;

// Define los parametros standard de la simulaci3n
unsigned int Intensidad;
int Tiempo;
int ind=10;

//Se definen dos byte para la intensidad
void setup() {
  byte Int1;
  byte Int2;
  // Inicializa los botones y caudalimetro
  pinMode(boton1,INPUT);
  pinMode(boton2,INPUT);
  pinMode(boton3,INPUT);
  pinMode(caudalimetro,INPUT);

  // Inicializa la LCD
  lcd.begin(16, 2);
  // Inicializa los valores de simulaci3n
  Intensidad= EEPROM.read(ind)*256+EEPROM.read(ind+1);
  if (Intensidad==65535) {Intensidad=200;}
  Tiempo= EEPROM.read(ind+2);
  if (Tiempo==255) {Tiempo=15;}
  // Pone mensaje de Inicio
  lcd.setCursor(3,0);
  lcd.print("ARLOAN 2.0");
  lcd.setCursor(4,1);
  lcd.print("@MEDSOIL");
  delay(2000);

  // Se ajustan los valores de intensidad y tiempo
  // para la nueva simulacion
  comenzar:

  Intensidad = menu("Int. de lluvia", Intensidad, "l/h.m2");
  Tiempo = menu("Tiempo de simulaci3n",Tiempo,"minutos");
  lcd.clear();
```

```

// Muestra los parametros de simulacion
// INTRO los valida
// Arriba vuelve al menu de seleccion

lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Int=");
lcd.print(Intensidad);
lcd.print(" mm/s");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("t=");
lcd.print(Tiempo);
lcd.print(" min");

while (digitalRead(boton1)&&digitalRead(boton3)) {};
if (!digitalRead(boton1)) {goto comenzar;}

// Guardamos los datos de la nueva simulacion

Int1=Intensidad/256;
Int2=Intensidad-Int1*256;
EEPROM.write(ind, Int1);
EEPROM.write(ind+1, Int2);
EEPROM.write(ind+2, Tiempo);

}
/** La funcion menu es la encargada de ajustar los valores
para la simulacion mediante el control de los tres botones
(up, down y enter **/
unsigned int menu(char titulo[16], unsigned int variable, char unidad[7]) { // Menu
  lcd.clear();
  while (digitalRead(boton3)) {

    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(titulo);
    if (variable<0) {variable=0;}
    if (variable<10) {
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd. print(" ");
      lcd .setCursor(4,1);
      lcd.print(variable);
    }
    else if (variable<100) {
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd. print(" ");
      lcd .setCursor(3,1);
      lcd.print(variable);
    }
    else if (variable<1000) {
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd. print(" ");
      lcd .setCursor(2,1);
      lcd.print(variable);
    }
  }
}

```



```

}
else {
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(variable);
}

lcd.setCursor(6,1);
lcd.print(unidad);
if (!digitalRead(boton1)) {
  variable++;
  while (!digitalRead(boton1)) {}
}
if (!digitalRead(boton2)) {
  variable--;

  while (!digitalRead(boton2)) {}
}
delay(10);
}
while (!digitalRead(boton3)) {}
delay(1000);
lcd.clear();
return variable;
}

// En la funcion loop() se ejecuta la simulacion

void loop()
{
  //Definimos variables para los calculos
  unsigned long pulso;
  unsigned long milisegundostotales;
  unsigned long pulsodeseado;
  byte motor=255; //la variable motor pone el motor ON al comienzo de la simulacion

  pulsodeseado=2806769.0/Intensidad; // Calculo de pulso deseado
  lcd.clear();
  analogWrite(bomba,motor); //Arranca la bomba motor=255
  delay(3000);

  milisegundostotales = (Tiempo * 60000) + millis(); // Calculo el tiempo en el que se detiene

  while (milisegundostotales > millis()) //ejecuta este loop hasta que pase nuestro tiempo
  {
    pulso=pulseIn(caudalimetro,HIGH);
    if (( pulso > pulsodeseado) && (motor < 255)) //si el caudalimetro corre mas de lo deseado,
    {
      motor++;
      analogWrite(bomba,motor); //sube el pwm de la bomba
    }
  }
}

```

```
else if (( pulso < pulsodeseado) && (motor >0)) //si el caudalimetro va mas despacio de lo que he programado
```

```
{
  motor--;
  analogWrite(bomba,motor); //baja el valor de pwm de la bomba
}
lcd.setCursor(0,0); //Mensajes que muestra durante la simulacion
lcd.print("Int.=");
lcd.setCursor(6,0);
lcd.print(Intensidad);
lcd.print("mm/h");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("espera=");
lcd.setCursor(8,1);
if (((milisegundostotales - millis())/1000) < 10) {lcd.print(" ");}
if (((milisegundostotales - millis())/1000) < 100) {lcd.print(" ");}
if (((milisegundostotales - millis())/1000) < 1000) {lcd.print(" ");}
lcd.print((milisegundostotales - millis())/1000);
lcd.print(" s");
delay(100);
}
```

```
// Fin de la simulaci3n
```

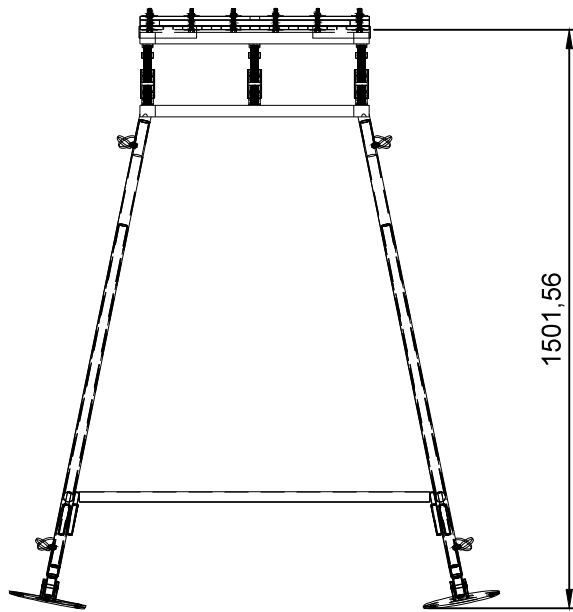
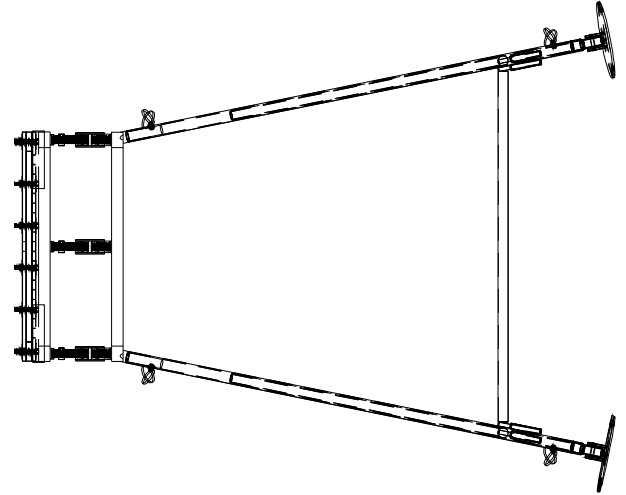
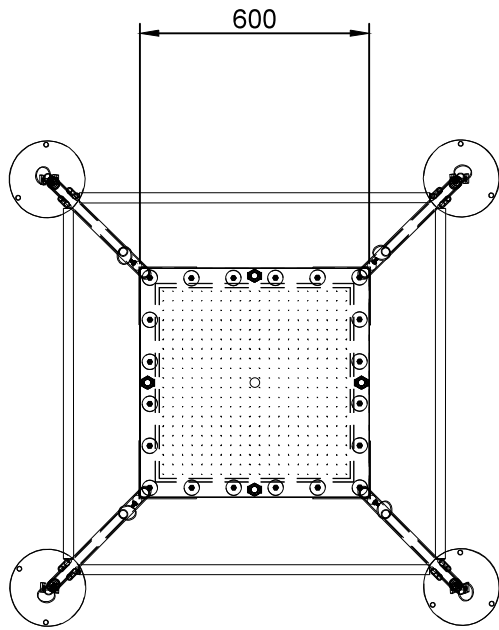
```
analogWrite(bomba,0); //Se apaga la bomba
```

```
lcd.clear(); //Mensaje final
lcd.setCursor(5,0);
lcd.print("Tiempo");
lcd.setCursor(3,1);
lcd.print("Finalizado");
```

```
while (1) {}
}
```

Anexo 3. Planos

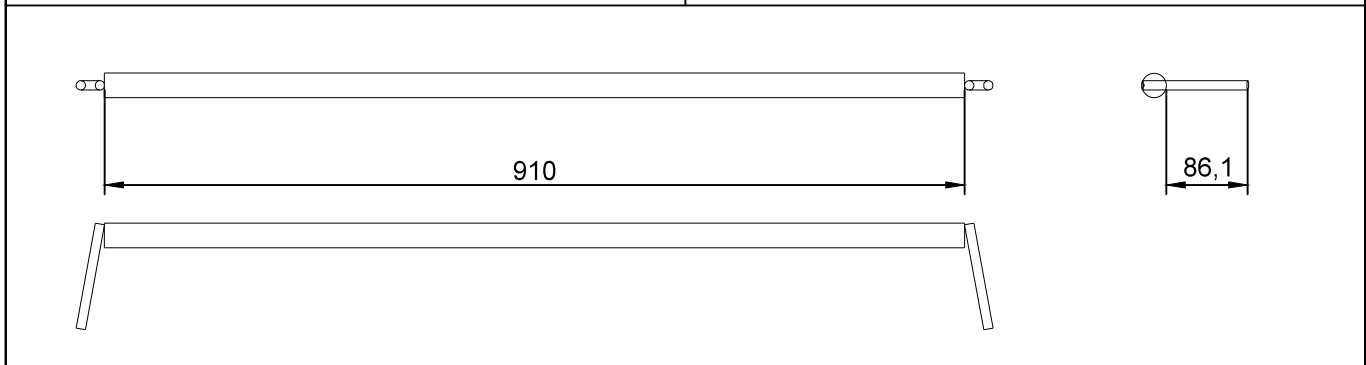
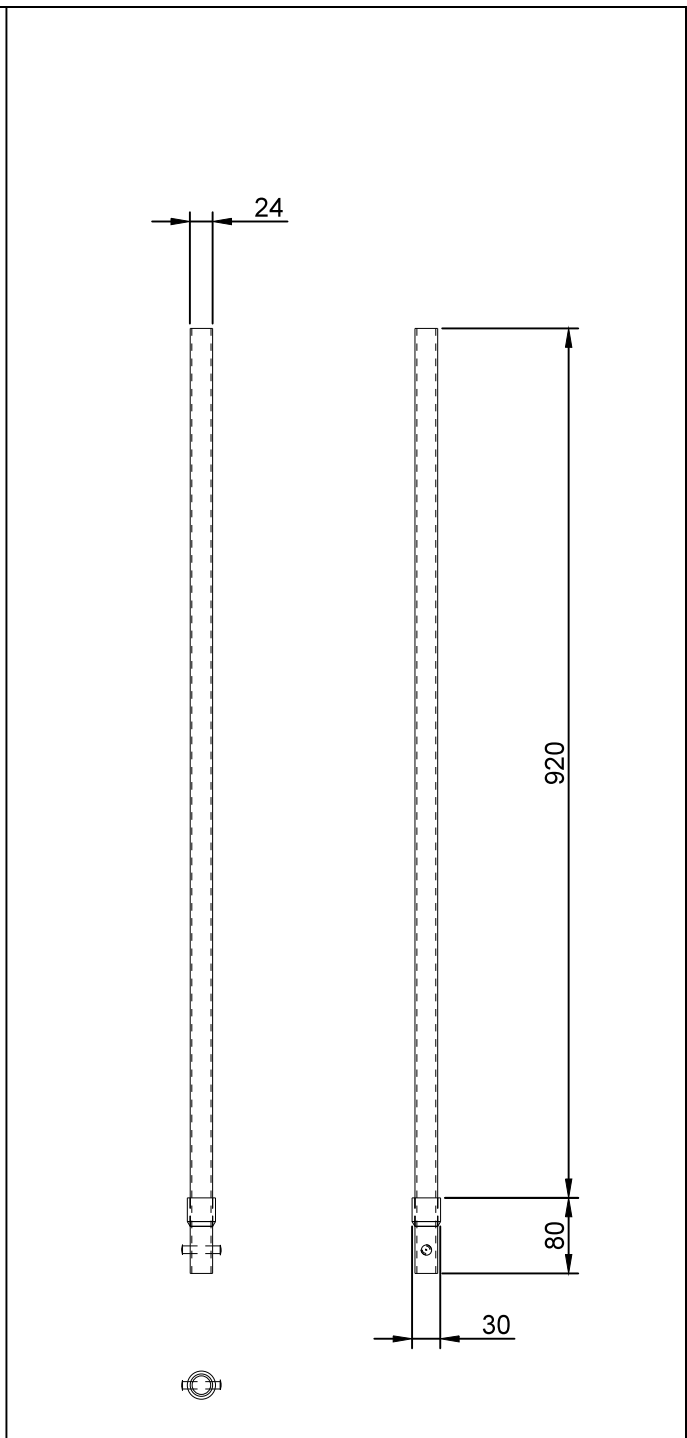
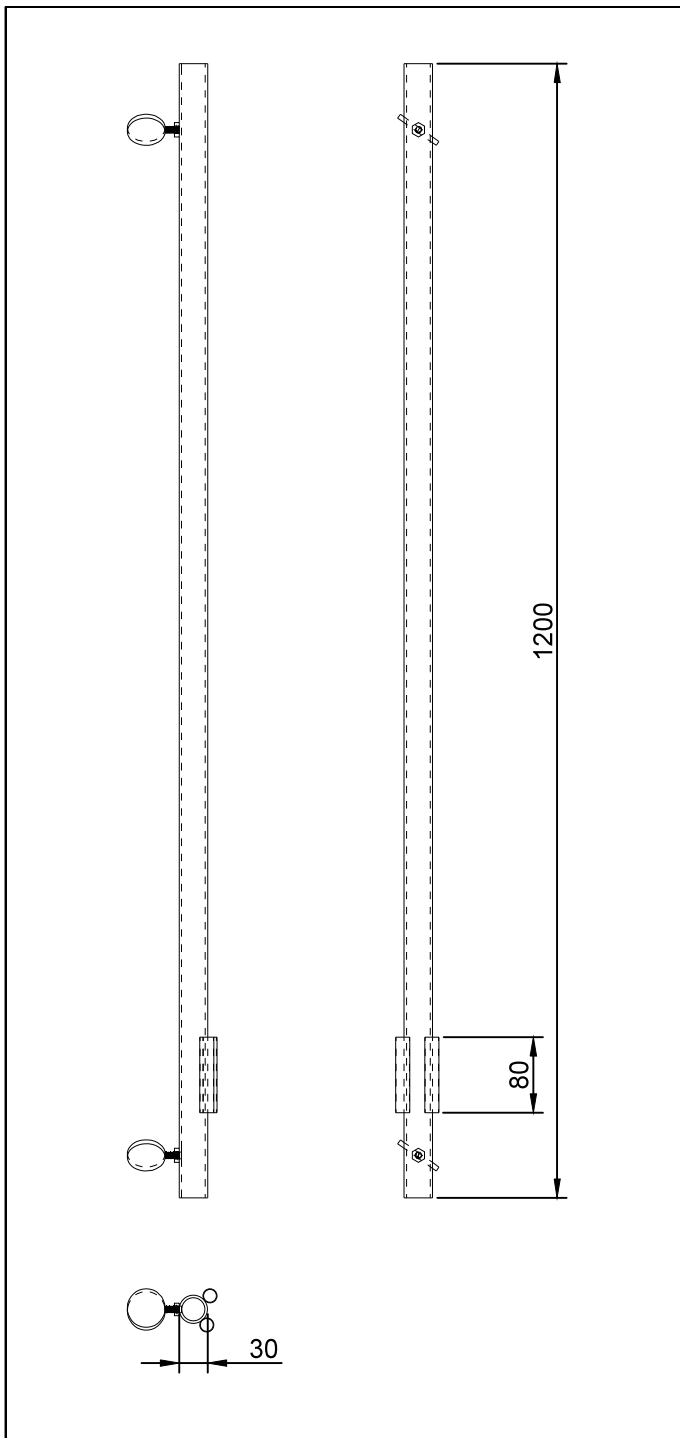
1. Vista completa.
2. Pies y traviesa.
3. Plataforma superior.
4. Plataforma inferior.
5. Depósito de agua.



DISEÑO Y MONTAJE DE UN SIMULADOR PARA ENSAYOS DE CAMPO: "ARLOAN"



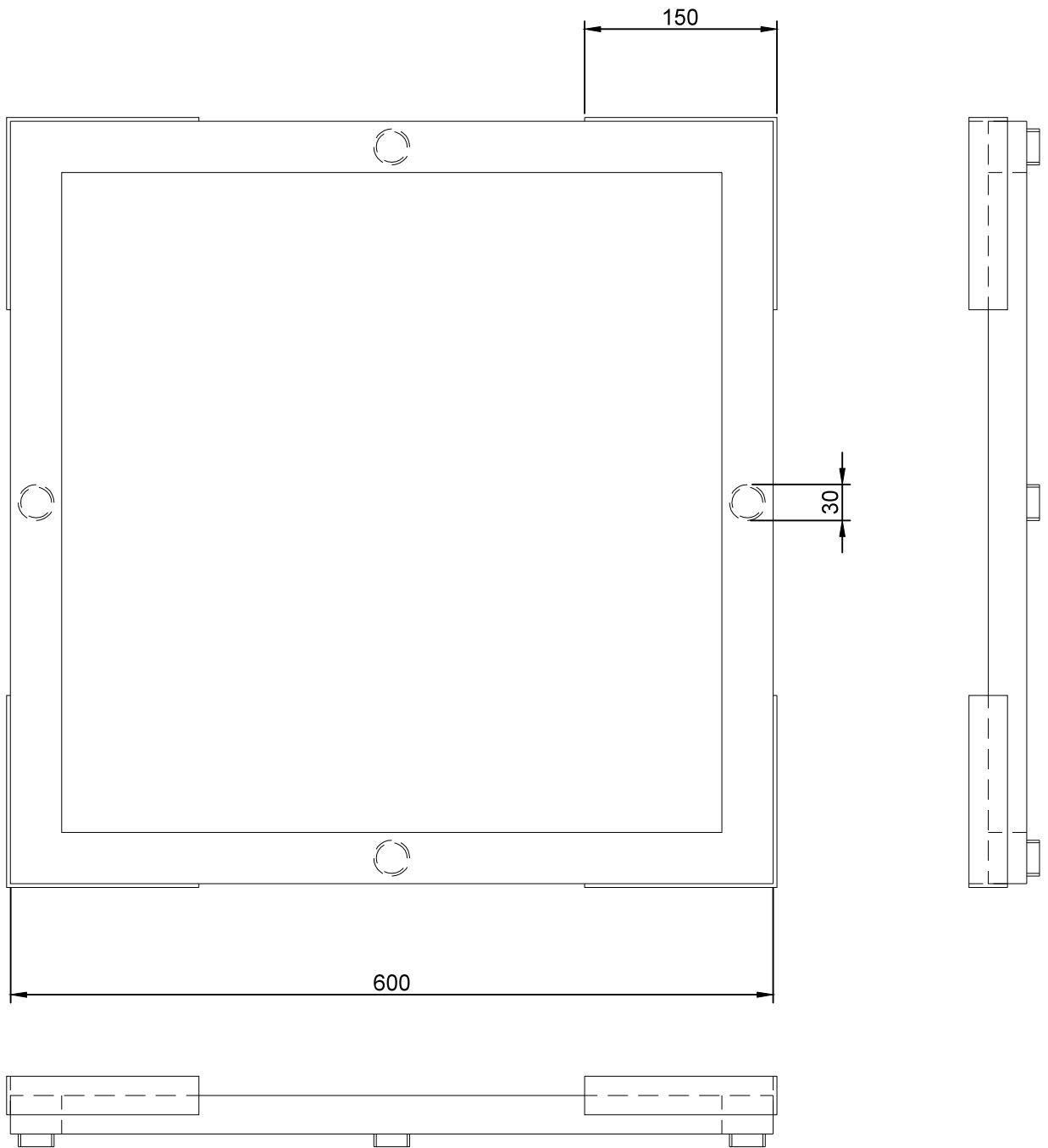
ESCALA: 1/20	VISTA COMPLETA	NÚMERO DE PLANO: 1
milímetros	AUTOR: Pedro J. Cervantes Rodríguez	FECHA: ENERO 2015 FIRMA:



DISEÑO Y MONTAJE DE UN SIMULADOR PARA ENSAYOS DE CAMPO: "ARLOAN"



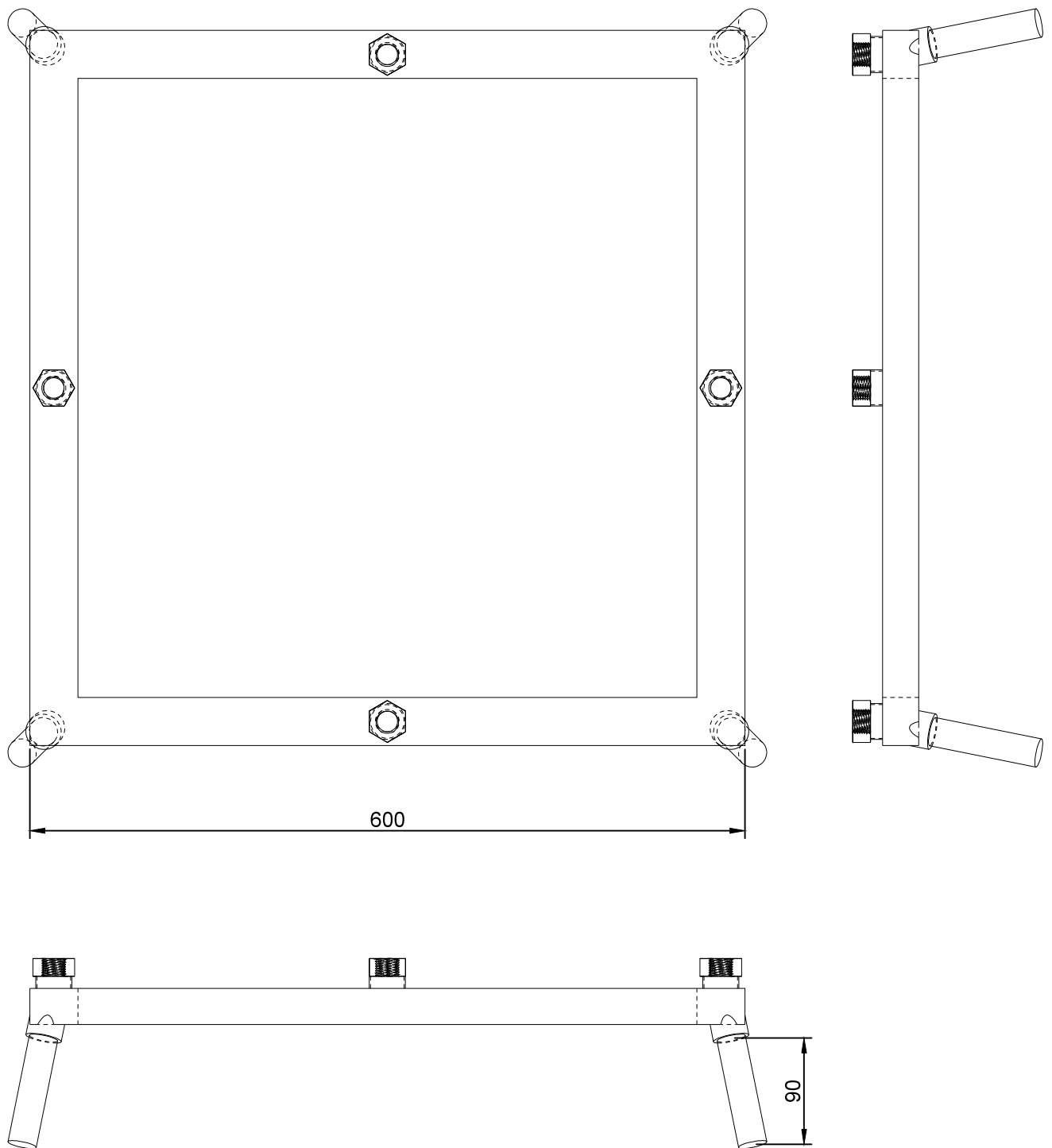
ESCALA: 1/8 milímetros	PIES Y TRAVIESA	NÚMERO DE PLANO: 2
	AUTOR: Pedro J. Cervantes Rodríguez	FECHA: ENERO 2015
		FIRMA:



DISEÑO Y MONTAJE DE UN SIMULADOR PARA ENSAYOS DE CAMPO: "ARLOAN"



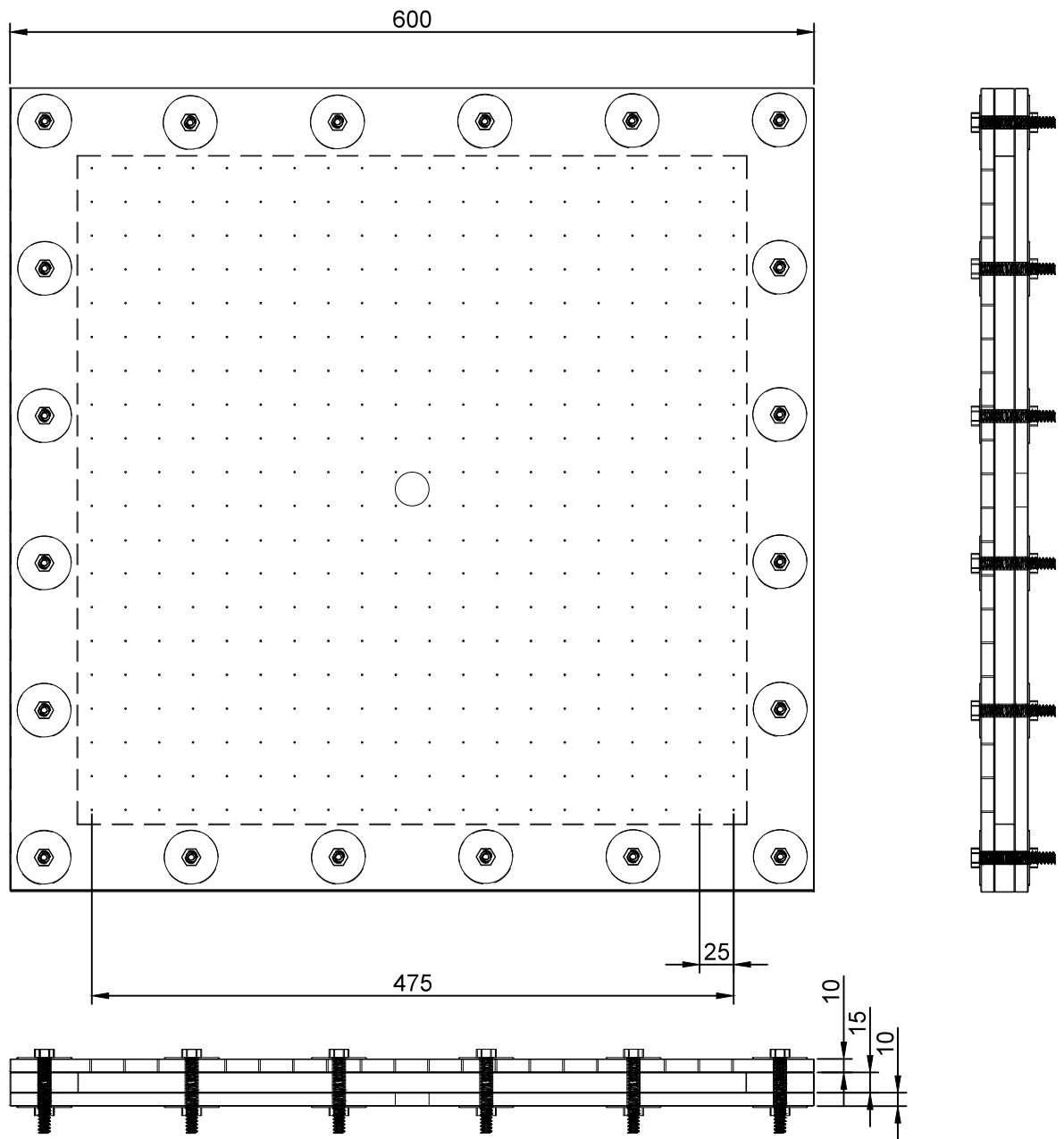
ESCALA: 1/5 milímetros	PLATAFORMA SUPERIOR	NÚMERO DE PLANO: 3
	AUTOR: Pedro J. Cervantes Rodríguez	FECHA: ENERO 2015
		FIRMA:



DISEÑO Y MONTAJE DE UN SIMULADOR PARA ENSAYOS DE CAMPO: "ARLOAN"



ESCALA: 1/5 milímetros	PLATAFORMA INFERIOR	NÚMERO DE PLANO: 4
	AUTOR: Pedro J. Cervantes Rodríguez	FECHA: ENERO 2015
		FIRMA:



DISEÑO Y MONTAJE DE UN SIMULADOR PARA ENSAYOS DE CAMPO: "ARLOAN"



ESCALA: 1/5 milímetros	DEPÓSITO DE AGUA	NÚMERO DE PLANO: 5
	AUTOR: Pedro J. Cervantes Rodríguez	FECHA: ENERO 2015 FIRMA:

