

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**



**TESIS DE GRADO**

**EFFECTO DE LAS HORMONAS DE ENRAIZAMIENTO EN ESQUEJES DE ÁLAMO**  
**(*Populus deltoides*) BAJO RIEGO POR CAPILARIDAD EN EL CENTRO**  
**EXPERIMENTAL DE PATACAMAYA**

**Presentado por:**

**LUIS GUSTAVO QUISPE CHAMBILLA**

**La Paz – Bolivia**

**2017**

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE AGRONOMÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**

**EFFECTO DE LAS HORMONAS DE ENRAIZAMIENTO EN ESQUEJES DE ÁLAMO  
(*Populus deltoides*) BAJO RIEGO POR CAPILARIDAD EN EL CENTRO  
EXPERIMENTAL DE PATACAMAYA**

*Tesis de grado presentado como requisito  
para optar el título de  
Ingeniero Agrónomo*

**LUIS GUSTAVO QUISPE CHAMBILLA**

**Asesores:**

Ing. Ph. D. José Yakov Arteaga García .....

Ing. Freddy Carlos Mena Herrera .....

**Tribunal revisor:**

Ing. M. Sc. Fanny Arragan Tancara .....

Ing. M. Sc. Wily Marco Flores Mancilla .....

Ing. M. Sc. Windson July Martinez .....

**APROBADO**

**Presidente tribunal revisor:** .....

*Dedicatoria*

*A quien llenó mi vida de alegría  
desde el momento en que le vi*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al centro experimental de Patacamaya dependiente de la Facultad de Agronomía por haberme brindado el espacio de trabajo.

A mis asesores Ing. Ph. D. Yakov Arteaga e Ing. Carlos Mena por el apoyo en las correcciones y observaciones que pasaron para presentar este trabajo.

A los miembros del tribunal revisor: Ing. M.Sc. Fanny Arragan Tancara, Ing. M.Sc. Wily Marco Flores Mancilla e Ing. M.Sc. Windson July Martínez por las sugerencias y recomendaciones en la redacción final del documento.

A mis hermanos David, Ana, Rosmery, Regina, Juria y Wilson que son su ejemplo, consejos, apoyo pude realizar este logro.

## ÍNDICE

DEDICATORIA .....	i
AGRADECIMIENTOS .....	ii
ÍNDICE.....	iii
RESUMEN .....	ix
ABSTRACT.....	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. OBJETIVOS.....	3
1.1.1. Objetivo general .....	3
1.1.2. Objetivos específicos.....	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1. Álamo.....	4
2.1.1. Origen y características del álamo.....	4
2.1.2. Bondades del álamo .....	4
2.2. Distribución geográfica del álamo .....	5
2.2.1. El álamo en el mundo .....	5
2.2.2. Recursos forestales en Bolivia.....	6
2.2.3. Plantaciones forestales en Bolivia .....	7
2.3. Propagación vegetativa.....	8
2.3.1. Tipos de esquejes y época de recolección .....	8
2.3.2. Las hormonas de enraizamiento.....	9
2.3.3. Rizogénesis .....	11
2.3.4. Diferenciación celular .....	11
2.4. Manejo del ambiente.....	12
2.4.1. Temperatura .....	12
2.4.2. Humedad relativa .....	12
2.4.3. Nebulización.....	12
2.4.4. Sustratos .....	12
2.5. Riego y circulación de agua .....	13
2.5.1. El agua capilar y movimiento del agua .....	13
2.5.2. Cámara de sub-irrigación .....	13

2.5.3.	Similitud con el perfil vertical de un agua subterránea .....	13
2.5.4.	Circulación del agua .....	14
2.6.	Medición de humedad del suelo .....	15
2.6.1.	Medida gravimétrica en base peso .....	15
2.6.2.	Bloques de resistencia.....	15
2.6.3.	Sensor de Humedad de suelo YI – 69 .....	16
2.6.4.	Arduino .....	17
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
3.1.	Localización .....	18
3.1.1.	Clima .....	18
3.1.2.	Temperatura .....	19
3.1.3.	Precipitación .....	19
3.1.4.	Humedad relativa .....	19
3.2.	Materiales .....	19
3.2.1.	Material biológico.....	19
3.2.2.	Materiales de campo .....	19
3.2.3.	Material de construcción.....	20
3.2.4.	Material de laboratorio .....	20
3.2.5.	Material de gabinete .....	20
3.3.	Método.....	20
3.3.1.	Construcción del sistema de irrigación capilar y nebulización .....	21
3.3.2.	Preparación de los enraizadores naturales .....	22
3.3.3.	Recolección de esquejes .....	22
3.3.4.	Desinfección de sustrato .....	23
3.3.5.	Plantación de esqueje .....	23
3.3.6.	Manejo del sistema de irrigación capilar .....	23
3.3.7.	Manejo del sistema de circulación .....	24
3.3.8.	Manejo del sistema de nebulización .....	24
3.3.9.	Diseño experimental .....	24
3.3.10.	Croquis del diseño .....	25
3.3.	Variables de respuesta .....	26

3.4.1.	Temperatura y humedad relativa .....	26
3.4.2.	Humedad del sustrato.....	26
3.4.3.	Porcentaje de prendimiento .....	26
3.4.4.	Número de raíces .....	26
3.4.5.	Longitud de raíz.....	26
3.4.6.	Altura de planta .....	27
3.4.7.	Número de hojas .....	27
3.4.8.	Costos parciales de producción .....	27
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	28
4.1.	Temperatura y humedad relativa.....	28
4.2.	Extracto de sauce .....	29
4.3.	Humedad del sustrato .....	30
4.4.	Variables de respuesta .....	32
4.4.1.	Porcentaje de prendimiento .....	32
4.4.2.	Número de raíces .....	34
4.4.3.	Longitud de raíz.....	35
4.4.4.	Altura de planta .....	38
4.4.5.	Número de hojas .....	42
4.4.6.	Costos parciales de producción .....	43
5.	CONCLUSIONES.....	45
6.	RECOMENDACIONES.....	46
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	47
	ANEXOS.....	53

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Principales países con bosques naturales de álamo.....	5
<b>Cuadro 2.</b> Principales países con plantaciones de álamos .....	6
<b>Cuadro 3.</b> Factores considerados y sus respectivos niveles en estudio .....	25
<b>Cuadro 4.</b> Análisis de varianza para el porcentaje de prendimiento .....	32
<b>Cuadro 5.</b> Prueba de Duncan del porcentaje de prendimiento para el factor riego .....	33
<b>Cuadro 6.</b> Análisis de varianza del número de raíces .....	34
<b>Cuadro 7.</b> Análisis de varianza de la longitud de raíz .....	35
<b>Cuadro 8.</b> Prueba de Duncan de la longitud de raíz para el factor riego.....	36
<b>Cuadro 9.</b> Prueba Duncan para la longitud de raíz del factor extracto.....	37
<b>Cuadro 10.</b> Análisis de varianza de la altura de planta .....	38
<b>Cuadro 11.</b> Prueba Duncan para la altura de planta para el factor riego .....	39
<b>Cuadro 12.</b> Análisis de varianza del número de hojas .....	42
<b>Cuadro 13.</b> Prueba Duncan del número de hojas para el factor extracto.....	42
<b>Cuadro 14.</b> Costos de producción por camas de propagación .....	43
<b>Cuadro 15.</b> Costo de producción unitario de los esquejes de álamo .....	44

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Unidades ecológicas en el bosque boliviano .....	7
<b>Figura 2.</b> Distribución vertical del agua subterránea realizada por Collazo y Montañaño .	14
<b>Figura 3.</b> Mapa de ubicación del centro experimental de Patacamaya de la UMSA .....	18
<b>Figura 4.</b> Distribución de las unidades experimentales en campo .....	25
<b>Figura 5.</b> Fluctuación de las temperaturas máxima, media y mínima .....	28
<b>Figura 6.</b> Comportamiento de la temperatura media y la humedad relativa en el interior de la carpa .....	29
<b>Figura 7.</b> Comparación de las humedades gravimétricas de los sustratos en las camas de propagación.....	30
<b>Figura 8.</b> Comparación Duncan $\alpha = 0,05$ realizada para la humedad del sustrato .....	31
<b>Figura 9.</b> Porcentaje de prendimiento promedio alcanzado de esquejes de álamo para el factor riego .....	33
<b>Figura 10.</b> Promedio de la longitud de raíces alcanzada para el factor riego.....	36
<b>Figura 11.</b> Longitud de raíz promedio alcanzado para el factor extracto.....	37
<b>Figura 12.</b> Alturas de planta promedio alcanzadas para el factor riego .....	39
<b>Figura 13.</b> Curvas de crecimiento de los esquejes de álamo.....	40
<b>Figura 14.</b> Número de hojas desarrolladas promedio del factor riego .....	43

## ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Registro de datos de campo.....	54
<b>Anexo 3.</b> Registro de las temperaturas media, máxima, mínima y humedad relativa ...	57
<b>Anexo 4.</b> Costo de producción .....	58
<b>Anexo 5.</b> Sketch de programación del sensor de humedad de suelo (YI – 69) para Arduino y esquema de ensamblaje.....	63
<b>Anexo 6.</b> Esquema de construcción de la cama de propagación.....	64
<b>Anexo 7.</b> Actividades desarrolladas en todo el trabajo de investigación .....	65

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realizó en el centro experimental de Patacamaya perteneciente a la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés con el objetivo de evaluar hormonas de enraizamiento naturales que poseen las hojas de sauce en esquejes de álamo propagados en camas de sub-irrigación. Se consideraron las siguientes variables: Porcentaje de prendimiento, número de raíces, longitud de raíz, altura de planta, número de hojas, humedad del sustrato y los costos parciales de producción. Se trabajó con seis tratamientos T1, Riego tradicional con sauce molido; T2, Riego tradicional con infusión de sauce; T3, Altura de agua de 10 cm con sauce molido; T4, Altura de agua de 10 cm con infusión de sauce; T5, Altura de agua de 20 cm con sauce y T6, Altura de agua de 20 cm con infusión de sauce.

Los tratamientos mostraron resultados estadísticamente iguales en todas las variables, mientras que el factor riego logró resultados significativos en todas las variables consideradas. Las comparaciones estadísticas realizadas en cada variable muestran que los esquejes plantados en las camas con riego capilar llegan a tener los más altos resultados de prendimiento 37,2 %, longitud de raíz 12,3 cm y altura de planta 10,8 cm en comparación al riego realizado de forma tradicional que logro obtener prendimiento del 7,7 %, longitud de raíz de 7,0 cm y altura de planta de 8,0 cm.

Por otro lado el factor extracto mostró únicamente significancia en la variable longitud de raíz, llegando a crecer hasta 10,6 cm con el extracto de sauce molido y 8,6 cm con la infusión de sauce. Respecto a la humedad del suelo medida con el sensor de humedad YI – 69, las camas provistas del riego capilar llegaron a registrar mayores valores de humedad gravimétrica 28,67 y 29,97 % entre tanto la cama con riego tradicional registro 10,74 % de humedad. Los costos parciales obtenidos fueron Bs 158,9 en la cama con riego tradicional, Bs 41,4 y 47,2 en las camas con riego capilar.

## ABSTRACT

The present research work was carried out in the experimental center of Patacamaya belonging to the Faculty of Agronomy of the Universidad Mayor de San Andrés with the objective of evaluating natural rooting hormones that has the sauce leaves in poplar schemes propagated in submarine beds. -irrigation. The following variables were considered: Percentage of yield, number of roots, length of plant, height of plant, humidity of the substrate and the partial costs of production. We worked with six treatments T1, Traditional watering with ground sauce; T2, Traditional watering with sauce infusion; T3, water height of 10 cm with ground sauce; T4, water height of 10 cm with sauce infusion; T5, height of water of 20 cm with sauce and T6, height of water of 20 cm with infusion of sauce.

The results are statistically the same in all the variables, while the factor of obtaining results in all the variables considered. The statistical comparisons made in each variable show that the cuttings planted in beds with capillary irrigation reach the high results of 37.2%, root length 12.3 cm and plant height 10.8 cm compared to irrigation performed In a traditional way, I achieve a yield of 7.7%, a root length of 7.0 cm and a plant height of 8.0 cm.

On the other hand, the factor of reduction of the length of the meaning of the olive oil extract, reaching to grow up to 10.6 cm with the extract of ground sauce and 8.6 cm with the sauce infusion. Regarding soil moisture measured with the humidity sensor YI - 69, beds provided with capillary irrigation reached the recorder higher values of gravimetric humidity 28.67 and 29.97%, meanwhile the bed with traditional irrigation register 10.74% moisture. The costs of the rooms were Bs. 158.9 in the bed with traditional irrigation, Bs 41.4 and 47.2 in the beds with capillary irrigation.

## 1. INTRODUCCIÓN

La multiplicación de algunas especies forestales no se puede llevar a cabo a través de reproducción sexual debido a que muchas de ellas presentan un bajo porcentaje de germinación o porque no logran formar las flores necesarias para que se realice la polinización y posterior formación de la semilla. La alternativa para poder multiplicar especies que presentan los anteriores problemas es mediante propagación vegetativa la cual permite replicar una planta madre desde una parte de ella (Ramírez, *et al.* 2012).

El álamo es una especie que logra crecer rápidamente, y posee la capacidad de reproducirse por vía vegetativa. En Bolivia esta especie es utilizada por programas de reforestación en las comunidades, en el Altiplano Sur los álamos pueden encontrarse en plazas como decorado. En suelos bien drenados suele usarse como barreras rompe vientos en la protección de cultivos (Villarpando *et al.*, 2011).

Los árboles de álamo ya establecidos en el Altiplano son idóneos ejemplares para poder realizar su multiplicación a través de la propagación vegetativa, debido a que lograron aclimatarse; por lo tanto las réplicas que logran formarse poseen una alta probabilidad de resistir las condiciones climáticas (Cortizo, 2011), citado por (Cerrillo *et al.* 2015).

Las fitohormonas están presentes en todas las plantas en diferentes partes de la misma, y se sintetizan de forma natural en los diferentes estados fisiológicos. Estas fitohormonas son las encargadas de regular el desarrollo y crecimiento de las plantas en cada una de sus etapas de desarrollo (Cruz *et al.* 2010).

Para promover el arraigamiento de las plantas en la propagación vegetativa se utiliza en la mayoría de las ocasiones hormonas de enraizamiento como el ácido indol acético (IAA) que es sintetizado de forma natural por las plantas y también es obtenido de forma sintética (Alegria, 2016).

Debido a la presencia de las fitohormonas en las plantas, estas pueden ser utilizadas para poder inducir al enraizamiento de cultivos forestales multiplicados por vía vegetativa. De esta forma se puede hacer uso de fitohormonas naturales para una producción orgánica de plantines forestales, reduciendo el uso de productos químicos sintetizados artificialmente.

Brindando condiciones adecuadas en ambientes donde sea posible la modificación de la temperatura y humedad relativa para la propagación de vegetativa, puede lograrse incrementar la población de las especies forestales y entre ellas a los árboles de álamo. Para incrementar el crecimiento de su población en un menor tiempo, se puede proveer de enraizadores naturales como lo son el agua de coco, preparados de sauce, extractos de aloe vera, extractos de lenteja, entre otros llegando a producir plantines de forma orgánica.

Las restricciones que se llega tener al momento de considerar la propagación de especies forestales en el Altiplano Sur del departamento de La Paz, son las condiciones climatológicas, debido a que en las regiones que pertenecen a dicho Altiplano presenta altas y bajas temperaturas en los periodos de invierno, bajas humedades relativas en la mayor parte del año, factores que desfavorecen a la propagación de especies forestales mediante el uso métodos asexuales como lo es la propagación por medio de esquejes (PDM, 2012).

Otra limitante que se presenta es la escasez de agua, siendo el agua de lluvia la forma de proveer agua a los árboles presentes en la zona. Además debido a las condiciones del clima de la zona llega a producirse una rápida evaporación del agua (PDM, 2012).

Por tal motivo, en el siguiente trabajo se evaluó la inducción al enraizamiento de esquejes de álamo sometidos a extractos de enraizadores naturales considerando dos formas de aplicación de riego para su desarrollo

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1. Objetivo general**

Evaluar el efecto de las hormonas de enraizamiento en esquejes de álamo (*Populus deltoides*) bajo riego por capilaridad en el centro experimental de Patacamaya.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Evaluar el efecto de los extractos de sauce como promotores de enraizamiento natural sobre los esquejes de álamo.
- Evaluar el efecto del tipo de riego sobre el crecimiento y desarrollo de los esquejes de álamo.
- Determinar los costos de producción parciales de la propagación vegetativa de álamo.

## **2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Álamo**

#### **2.1.1. Origen y características del álamo**

El álamo (*Populus deltoides*) es una especie que pertenece a la familia Salicaceae, su origen es en la Cuenca del Mediterráneo, Asia. Son resistentes a cambios de temperatura fuertes y algunas heladas. Se desarrollan en suelos pobres, arcillosos o calcáreos (Villarando *et al.*, 2011). COFSF (2016) indica, que son especies de hoja caduca, de clima templado y con posibilidad de reproducción asexual mediante porciones de tallo y ramas dado el fácil enraizamiento de estacas.

Son árboles deciduos o semi perennes, la forma de la copa varía según la especie, pudiendo ser globosa, oblongo o piramidal. La corteza posee grietas y figuras que varían según la especie y la variedad. Las hojas son simples, alternas pecioladas y con estípulas. La forma es oval a triangular con lóbulos de distinta profundidad. Es frecuente el dimorfismo y heteromorfismo (Di Marco, 2015).

#### **2.1.2. Bondades del álamo**

Las especies forestales poseen bondades forestales y medio ambientales.

##### **2.1.2.1. Productos forestales**

Los álamos han sido de utilidad debido a su rápido crecimiento, facilidad de clonación, adaptabilidad y variados usos de la madera: aserrado, debobinado, celulosa, fibras y partículas para la producción de tableros y biomasa con fines energéticos. (Cortizo, 2011), citado por (Cerrillo *et al.*, 2015).

##### **2.1.2.2. Usos medio ambientales**

En varios países se utilizan álamos y sauces principalmente con fines medioambientales, tales como protección del suelo, que constituyen servicios valiosos más bien que productos forestales. También juegan un rol de importancia en la mejora y conservación del ambiente, especialmente en la protección de las cuencas y cultivos, en la remediación de aguas y suelos contaminados y en el balance de dióxido de carbono (Cortizo, 2011), citado por (Cerrillo *et al.*, 2015).

## 2.2. Distribución geográfica del álamo

### 2.2.1. El álamo en el mundo

El cultivo del álamo se extiende alrededor de 70 países, en combinación con otras especies forestales en estado natural, en plantaciones y como árboles separados en el paisaje (incluyendo diferentes sistemas agroforestales). Según datos ofrecidos por la Comisión Internacional del Álamo, el álamo ocupa más de 80 millones de hectáreas en todo el mundo siendo Rusia, Canadá y los Estados Unidos de América los países con la mayor superficie natural de álamo, y, China, India y Pakistán los países que cuentan con superficies más extensas cultivada de álamo. La gran mayoría de los álamos crecen en bosques naturales. En el mundo, el 91% de los álamos están en bosques naturales, el 6% en plantaciones y el 3% en sistemas agroforestales y como árboles fuera de los bosques (OISM y M, 2010).

Ball *et al.* (2005) indica que la superficie total ocupada por los álamos en condición natural que dan cuenta los informes de los países es de más de 70 millones de hectáreas, el 97 % de ellas en Canadá, la Federación de Rusia y los Estados Unidos, donde se utilizan sobre todo para la producción de madera. En los otros países principales con bosques naturales de álamos que se puede observar en el cuadro 1, se cultivan principalmente con fines medio ambientales como conservación *in situ*, protección del suelo y del agua, y restauración del paisaje.

**Cuadro 1.** Principales países con bosques naturales de álamo

País	Superficie (1000 ha)
Canadá	28300
Federación de Rusia	21900
Estados Unidos	17700
China	2100
Alemania	100
Finlandia	67
Francia	40
India	10
Italia	7

Fuente: Ball *et al.* 2005

En el cuadro 2 se muestra los países con plantaciones de álamo para la producción de madera, plantaciones con fines medio ambientales o por plantaciones agroforestales.

**Cuadro 2.** Principales países con plantaciones de álamos

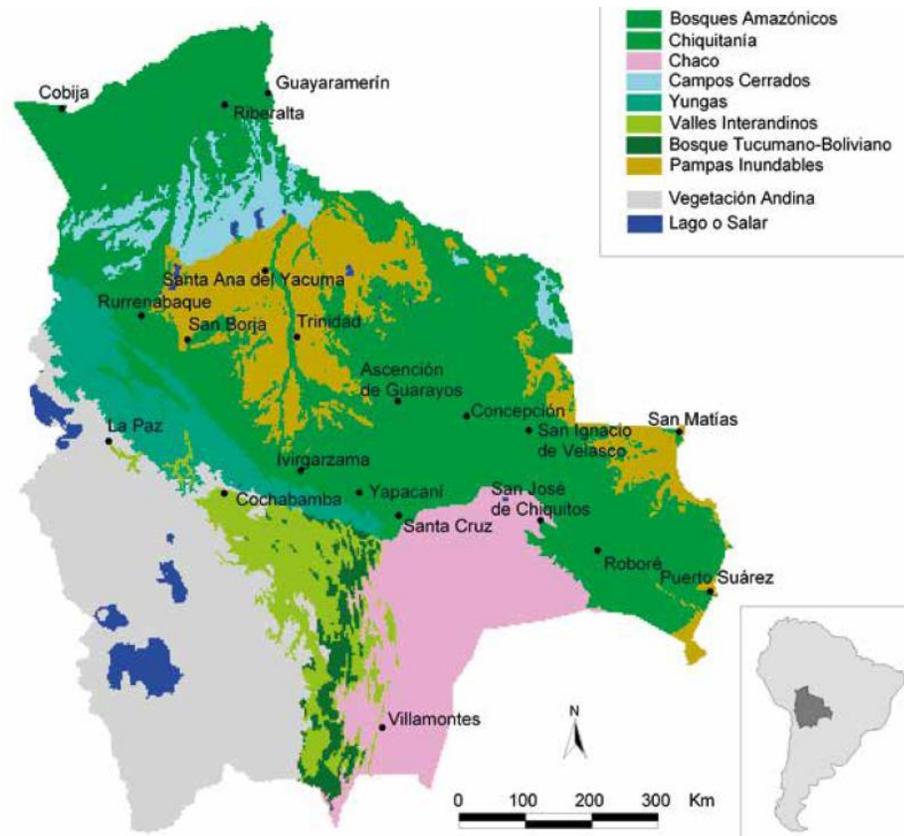
<b>País</b>	<b>Superficie (1000 ha)</b>
China	49000
India	1000
Francia	236
Turquía	130
Italia	119
Argentina	64

**Fuente:** Ball *et al.* 2005

Las salicáceas son nativas del hemisferio norte, desde el círculo polar ártico hasta el paralelo 30, solo pocas especies se encuentran en el hemisferio sur. Los álamos están presentes en forma esporádica en todos los bosques de la región templada del hemisferio norte, en algunas zonas pueden formar pequeños bosquetes o macizos. Los sauces tienen una distribución natural más amplia, se encuentran presentes también en el hemisferio sur (Amico, s.f.).

### **2.2.2. Recursos forestales en Bolivia**

Bolivia está entre los países con mayor superficie de bosques tropicales. Aproximadamente existen 50 millones hectáreas de bosques en el país de las cuales cerca del 80 % se encuentra en las tierras bajas y el 20 % restante en la vertiente oriental de la cordillera de los Andes, en los valles interandinos y, en menor grado, en el Altiplano. Aproximadamente la mitad de la superficie de Bolivia está ocupada por bosques. Sin embargo, al mismo tiempo, se pierde una importante cantidad de bosques cada año. Las mayores tasas de deforestación se encuentran en las tierras bajas del país, donde se concentra la mayor parte de los bosques. La degradación de bosques, en cambio, ha sido más severa en los bosques andinos (Müller *et al.*, 2014).



Fuente: Araujo et al. (2010)

**Figura 1.** Unidades ecológicas en el bosque boliviano

### 2.2.3. Plantaciones forestales en Bolivia

Las plantaciones forestales en Bolivia son todavía poco significativas. La implantación de áreas de plantación está basada principalmente en programas establecidos entre comunidades locales y organismos internacionales, en los cuales, se busca la generación de ganancias para pequeños propietarios rurales, la recuperación de áreas degradadas y, la erradicación y sustitución de cultivos de coca entre otros. Las principales especies consideradas para plantaciones forestales son exóticas y han sido bastante difundidas en planes de forestación y reforestación implantados en América Latina, destacándose entre las principales el *Pinus*, *Eucaliptos*, *Acacia*, *Casia*, *Populus* y *Greviela*. (Malky, 2005)

## **2.3. Propagación vegetativa**

Ramírez *et al.* (2012) indican, muchas plantas no producen semillas, o si producen, éstas son vanas, así que la vía asexual o vegetativa es un medio alternativo de propagación.

El principio básico de este tipo de propagación es la capacidad que tienen ciertas partes de los vegetales de emitir raíces y finalmente formar una planta nueva. La propagación vegetativa incluye procedimientos sencillos y muy utilizados en jardinería como es tomar partes de la planta madre, esquejes de tallo, raíz u hoja, bulbos, rizomas y tubérculos y propiciar el enraizamiento en un medio poroso. Las plantas propagadas en forma vegetativa son idénticas a la planta madre puesto que no ha ocurrido recombinación de material genético. Además, es un método rápido que produce plantas con características de un vegetal adulto, o sea florecen y fructifican en corto tiempo, situación que no ocurre en muchas plantas obtenidas de semilla (Saldías, 2011).

### **2.3.1. Tipos de esquejes y época de recolección**

De acuerdo a la especie que se trate se puede conseguir, esquejes herbáceos que se obtiene de plantas herbáceas, algunos arbustos y cactáceas, se recolectan en primavera, verano y a principio de otoño; esquejes semileñosos de arbustos siempreverdes y algunos de follaje caduco su recolección se lleva a cabo durante la primavera y principios de verano, y esquejes leñosos principalmente de arbustos caducos, algunos siempreverdes y coníferas, son preparados para la propagación a fines de otoño e invierno para los caducos y hasta la primavera para los siempreverdes (Saldías, 2011).

Ipizía (2011), citado por (Quispe, 2013) indica, los esquejes obtenidos de especies leñosas deben ser tomadas en periodo de inicio de lluvias. Su dimensión varía entre 7 y 15 cm de longitud, reteniendo las hojas de la parte superior. Si fueran grandes deben ser reducidas para evitar pérdida de agua y permitir un menor espaciamiento en la cama de cultivo.

#### **2.3.1.1. Conserva de los esquejes**

Sisaro y Hagiwara (2016), indican que desde su cosecha hasta su plantación en el sustrato de enraizamiento y colocación en el ambiente definitivo de enraizamiento es fundamental el mantenimiento del estado hídrico de las esquejes. No solo es importante

evitar la pérdida del contenido interno de agua de los esquejes, sino también evitar que aumenten su temperatura durante el transporte principalmente en algunas especies de hoja compuesta, pequeña o propensa a la oxidación. En caso de cosechar los esquejes durante el mediodía o a la tarde con elevadas temperaturas, es conveniente bajar la temperatura de las mismas inmediatamente sumergiéndolas en agua fría y luego aislarlas del medio externo envolviéndolas en papeles de diario humedecidos. Para el transporte de grandes distancias es conveniente el uso de una conservadora portátil.

### **2.3.2. Las hormonas de enraizamiento**

En el proceso de enraizamiento los cortes de los esquejes comienzan a cicatrizar, formando un callo que desempeña una función tanto de compartimiento como de reparación. Se trata de una mezcla de células del meristemo (en condiciones de multiplicarse) y de células parenquimatosas (que contienen sustancias de reservas de las plantas). Gracias al fenómeno de la totipotencia (la capacidad de las células para reproducir una planta entera), estas células pueden ser orientadas hacia una función antes que hacia otra (Colombo, 2006).

Las hormonas son sustancias que orientan o regulan procesos determinados o fases de la vida de las plantas. Pueden ser naturales o sintéticas, aquellas que favorecen el enraizamiento de los esquejes pertenecen a la categoría de las auxinas.

#### **2.3.2.1. Auxinas**

Las auxinas fueron las primeras fitohormonas identificadas, el ácido indol acético (AIA) es la principal auxina endógena de las plantas. La mayoría de las moléculas que integran este grupo son derivados indólicos, aunque también se encuentran algunos compuestos fenoxiacéticos, benzoicos o picolínicos con actividad auxínica. Las auxinas se encuentran en la planta en mayores cantidades en las partes donde se presentan procesos activos de división celular, lo cual se relaciona con sus funciones fisiológicas asociadas con la elongación de tallos y coleóptilos, formación de raíces adventicias, inducción de floración, diferenciación vascular, algunos tropismos y promoción de la dominancia apical (Cruz *et al.*, 2010).

Alegria (2016) menciona, el AIA se sintetiza principalmente en el ápice de las yemas, y se transporta polarmente hacia la raíz a través de las células parenquimáticas asociadas

al tejido vascular. Una vez llegada al tejido receptor, el transporte de las auxinas es a través de las células de forma polar, activa y unidireccional con el consiguiente consumo energético.

#### **2.3.2.2. Giberelinas**

Las giberelinas son un grupo de diterpenoides que se definen más por su estructura que por su actividad biológica, contrario a lo que ocurre con las auxinas y las citoquininas. Se encuentran mayores niveles de giberelinas en las partes reproductivas en comparación con las vegetativas, y en partes jóvenes en comparación con las maduras. Se encuentra con facilidad en ápices de tallos y raíces, en hojas jóvenes, partes florales, semillas inmaduras y embriones en germinación. Las giberelinas biológicamente activas, actúan como reguladores esenciales del desarrollo de las plantas y cubren todos los aspectos de la historia de vida de ellas, modulando varias respuestas del crecimiento como la germinación de semillas, el crecimiento del tallo, la partenocarpia, la expansión foliar, la elongación de la raíz, la floración y la liberación de enzimas hidrolíticas en algunos tejidos (Cruz *et al.*, 2010).

#### **2.3.2.3. Citoquininas**

Las citoquininas naturales son derivados de la adenina con un sustituyente, isoprenoide (citoquininas isoprenoídicas) o aromático (citoquininas aromáticas), en el nitrógeno amínico de la posición 6. Se considera que la síntesis de citoquininas se lleva a cabo, mayoritariamente, en el ápice de la raíz, aunque también en menor medida, en embriones, meristemos jóvenes de hojas, frutos y callos, como los inducidos por infección bacteriana (Alegria, 2016).

Este grupo de fitohormonas es considerado el responsable de los procesos de división celular, entre los que se encuentran la formación y crecimiento de brotes axilares, la germinación de semillas, la maduración de cloroplastos, la diferenciación celular y también el control de varios procesos vegetales como el retardo de la senescencia y en la transducción de señales (Cruz *et al.*, 2010).

La diferenciación de las células indeterminadas de agallas y callos a órganos es dependiente del cociente citoquinina/auxina. Si es favorable a las citoquininas, se induce

formación de yemas y tallos (caulogénesis), y si lo es a las auxinas, se inducen raíces (rizogénesis) (Alegria, 2016).

### **2.3.3. Rizogénesis**

Las raíces adventicias suelen originarse a partir de células que se dividen en proximidad del floema de los vasos conductores, los cuales forman callo del que se diferencian luego las raíces. Si se produce una herida en una planta herbácea, las células parenquimáticas próximas a la herida se diferencian y vuelven a dividirse para formar un callo cicatricial, el cual corresponde a un conjunto de células parenquimáticas en varios estados de lignificación. En los vegetales leñosos, el callo suele proceder del cambium, aunque también de la corteza y medula. Más tarde empiezan a aparecer en algunas células del callo diferenciaciones que conducen a un nuevo tejido, se forman por ejemplo, puntos vegetativos caulinares o radiculares y se establece la unión con los elementos conductores (Strasburger, 1994) citado por Ortiz (2014).

### **2.3.4. Diferenciación celular**

Para que un cuerpo se desarrolle es necesario que las células se especialicen y lleguen a ser estructural y funcionalmente diferentes. El conjunto de cambios que hacen posible la especialización celular se denomina diferenciación. La diferenciación celular depende de la expresión diferencial del material genético. Las células diferenciadas retienen, por tanto, toda la información necesaria para regenerar una planta completa, es decir son totipotentes, una propiedad muy poco frecuente en las células animales (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

Botti (1999) citado por Ortiz (2014) menciona, la formación y el desarrollo de raíces a partir de estacas pueden dividirse en cuatro etapas: inducción y diferenciación de un grupo de células meristemáticas, aumento de las divisiones celulares para formar primordios iniciales, organización de estos grupos en primordios radiculares y crecimiento, diferenciación y emergencia de las nuevas raíces incluyendo la ruptura de tejidos superficiales para permitir su salida y la conexión vascular con los tejidos vasculares de la estaca.

## **2.4. Manejo del ambiente**

### **2.4.1. Temperatura**

Junto con la humedad relativa es un factor decisivo en el enraizado. Para acelerar la formación de raíces es conveniente que la base del esqueje esté a una temperatura más elevada que la parte aérea. De esta forma se fuerza el metabolismo y la diferenciación que provocará la rizogénesis. La temperatura ambiente óptima para la mayor parte de los esquejes es de 18 a 20 °C. Para disminuir la temperatura del aire en los invernaderos de multiplicación pueden instalarse sistemas de refrigeración activa como los sistemas de enfriamiento y el sistema de verdadera niebla. Ambos sistemas además de disminuir la temperatura aumenta la humedad relativa del aire (Martínez, 2005).

### **2.4.2. Humedad relativa**

Mohan (2016) considera, que los esquejes deben permanecer erectos (hidratados) para la generación exitosa de raíces. Debido a que los nuevos esquejes de tallo no tienen raíces, no pueden absorber suficiente agua para mantenerse con vida. Además, la transpiración contribuye a la desecación.

La humedad relativa es importante mantenerla elevada, para minimizar la transpiración y evaporación, que se produce en las estaquillas cortadas, ésta debe mantenerse cerca al punto de saturación 80 %, que se consigue mediante riego por aspersión muy fina o nebulización (Vásquez, 2001).

### **2.4.3. Nebulización**

La nebulización o conocido como verdadera niebla artificial consiste en instalar una red de boquillas especiales, generalmente a la altura de las canales de desagüe del invernadero, que inyectan una mezcla de presión de aire y agua produciendo una verdadera niebla. Las microgotas de agua al evaporarse absorben calor del aire y por tanto disminuye la temperatura (Martínez, 2005).

### **2.4.4. Sustratos**

Para Reyes (2015), un buen medio de enraizamiento debe estar limpio y con buen drenaje. Puede emplearse arena o grava fina y si su capacidad de retención de agua es muy baja se puede mejorar añadiendo turba, vermiculita u otros materiales.

Quinteros (2014) concluye, que diferentes sustratos muestran efectos significativos en el enraizamiento de los esquejes de queñua (*Polylepis besseri* y *P. tarapacana*), siendo las proporciones de sustrato 1:3 y 1:1 de turba y arena en que se desarrolla mejor, considerando una cama de propagación con un sistema de sub-irrigación.

## **2.5. Riego y circulación de agua**

### **2.5.1. El agua capilar y movimiento del agua**

Para Müller (2012) la capilaridad es el fenómeno debido a la tensión superficial que confiere a los fluidos la capacidad de subir o bajar por un tubo capilar. Mientras mayor es el diámetro del capilar menor es la altura a alcanzar por el fluido. La capilaridad es la capacidad que tiene el agua de ascender por pequeños canales o canalículos capilares formados por orificios intersticiales del suelo.

Según Andreau *et al.* (2015), la capilaridad consiste en que el sustrato tiene la capacidad de adsorber y distribuir en todas las direcciones la solución nutritiva a través de los microporos. Cuando el sustrato tiene baja capilaridad, la solución nutritiva se mueve verticalmente a través del perfil del mismo, drena rápidamente, dejando zonas secas en las cuales no se puede desarrollar las raíces. Cuando el sustrato tiene una buena capilaridad, el agua es adsorbida en todas direcciones, haciendo que las raíces de las plantas encuentren una humedad homogénea en todo el recipiente.

### **2.5.2. Cámara de sub-irrigación**

Miranda (2016) indica, que es una estructura de madera forrada con plástico impermeable, en su interior posee estratos sucesivos. Los primeros 25 cm del inferior contiene piedra de 10 cm de diámetro además es donde se llena de agua, los siguientes estratos son de piedras con diámetros de 3 – 6 cm, grava y el último sustrato superior es el sustrato de enraizamiento.

### **2.5.3. Similitud con el perfil vertical de un agua subterránea**

La descripción del perfil vertical de los estratos que posee una cámara de sub-irrigación sería parecida a la zona no saturada del perfil del agua subterránea descrita por Collazo y Montaña (2012), señalan que la zona no saturada está situada entre la superficie del

terreno y la superficie freática, sus poros y/o fisuras están ocupados por agua y aire, y, está se subdivide tres zonas como se muestra en la figura 2.

### 2.5.3.1. Zona de evaporación o zona edáfica

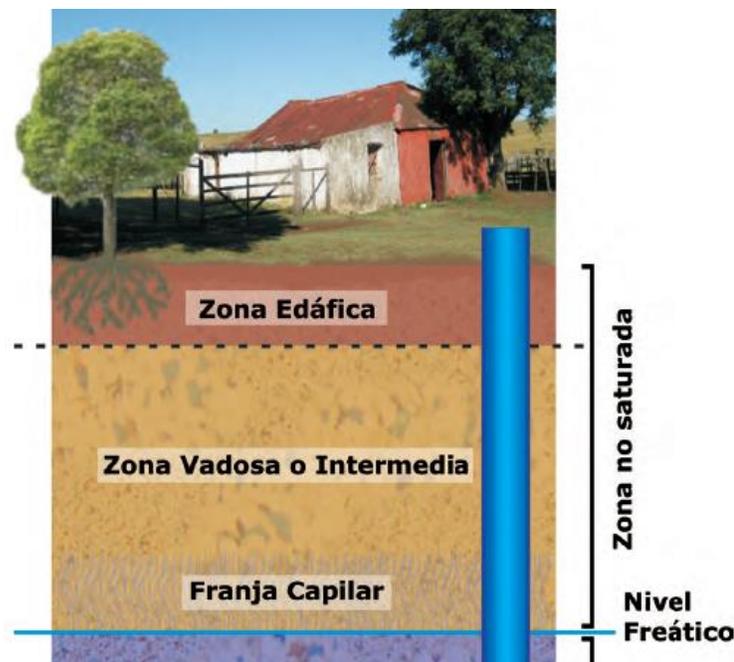
Se extiende hasta donde llegan las raíces de la vegetación existente; por lo tanto tiene espesor variable y se caracteriza por ser la sección donde los procesos físico-químicos y biológicos, son más intensos y variados.

### 2.5.3.2. Zona intermedia

Está comprendida entre el límite del ascenso capilar del agua y el límite de alcance de las raíces de las plantas.

### 2.5.3.3. Zona capilar

Se encuentra desde la superficie freática hasta el límite de ascenso capilar del agua.



Fuente: Collazo y Montaña. 2012

Figura 2. Distribución vertical del agua subterránea realizada por Collazo y Montaña

### 2.5.4. Circulación del agua

Debido a que el agua está confinada en la parte inferior de los estratos de la cámara de sub-irrigación puede ocurrir que el agua llegue a fermentarse por la falta de oxigenación

lo cual podría repercutir sobre el desarrollo de las raíces de los cultivos (Calcina, 2015). Andreau *et al.* (2015) señalan, que en sistemas hidropónicos de solución estática la falta de oxígeno es frecuente a altas temperaturas. La oxigenación se realiza por aireación forzada (burbujeo de la solución) por medio de un compresor. En los sistemas recirculantes la solución nutritiva puede circular de forma continua o intermitente en canales profundos o semiprofundos donde el aporte de oxígeno no es necesario, ya que la solución se encuentra en movimiento.

## **2.6. Medición de humedad del suelo**

### **2.6.1. Medida gravimétrica en base peso**

Los métodos gravimétricos miden el porcentaje de peso del suelo que corresponde al agua. El porcentaje de humedad por peso, puede entonces convertirse a otras unidades. Para medir el porcentaje de humedad de una muestra de suelo por peso, la muestra se pesa y su peso se registra, entonces se seca en una mufla, se registra el peso después de ser secado en la mufla. La diferencia entre los dos pesos proporciona el peso del agua en el suelo. El porcentaje de humedad es la cantidad de humedad dividida por el peso de secado al horno, como se muestra en la ecuación 1 (Quiroga y Bono, 2012).

$$\% H = \frac{MSH - MSS}{MSS} * 100 \quad (1)$$

Donde:  $\% H$  es el porcentaje de humedad gravimétrica

$MSH$ , es la masa del suelo húmedo

$MSS$ , es la masa del suelo seco

### **2.6.2. Bloques de resistencia**

El bloque de resistencias consiste en dos electrodos, se empotran en bloque de yeso, de fibra de vidrio o de otro material. Una vez en el suelo, el dispositivo mide la resistencia al flujo eléctrico entre los dos electrodos. Es más difícil para la electricidad fluir en un suelo seco que en un suelo húmedo, por lo que la lectura indica el nivel de humedad. Los bloques de resistencia trabajan bien entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento Plaster (2000).

Bittelli (2011) indica, el método gravimétrico directo es el método de referencia para la medición del contenido de agua del suelo, comúnmente utilizado para la calibración de los métodos indirectos como lo son los sensores comerciales.

### **2.6.3. Sensor de Humedad de suelo YI – 69**

Los sensores de humedad de suelo pueden leer la cantidad de humedad presente en el suelo que la rodea. Este sensor utiliza dos sondas para pasar la corriente a través del suelo, y luego lee esa resistencia para obtener el nivel de humedad. Más agua hace que el suelo conduzca la electricidad más fácilmente (menos resistencia), mientras que el suelo seco conduce la electricidad pobremente (más resistencia) (Elecbreaks, 2015).

Según García (2014), el sensor YI – 69 consiste en dos placas separadas entre sí por una distancia determinada. Ambas placas están recubiertas de una capa de material conductor. Si existe humedad en el suelo se creará un puente entre una punta y otra, lo que es detectado por un circuito de control con un amplificador operacional que es el encargado de transformar la conductividad registrada a un valor analógico que puede ser leído por Arduino. En la salida analógica el nivel de voltaje dependerá directamente de cuanta humedad haya en el suelo. Es decir, dependiendo de cuanta conductividad (producto del agua en el suelo) haya entre las puntas del módulo, así variará el valor entregado por Arduino (entre 0 y 1023).

Para myrobotself (2016), las lecturas analógicas registradas por Arduino se divide en tres intervalos 0 – 350, 351 – 600, 601 – 1023, correspondiendo a los estados de humedad, suelo muy mojado, suelo húmedo y suelo seco respectivamente.

La variación de los niveles de sal afecta las lecturas de humedad de los sensores capacitivos (Noreña y Cortés, 2015). Por lo que los instrumentos electrónicos utilizados deben calibrarse para cada suelo debido al contenido de sal y potencial mátrico de los diferentes suelos (Plaster, 2000).

#### **2.6.4. Arduino**

Arduino es una pequeña placa de microcontrolador con un puerto USB para conectar al ordenador y diversos zócalos de conexión que se pueden conectar mediante cableado a todo tipo de componentes, como motores, relés, sensores de luz, diodos laser, altavoces, micrófonos, entre otros (Monk, 2012).

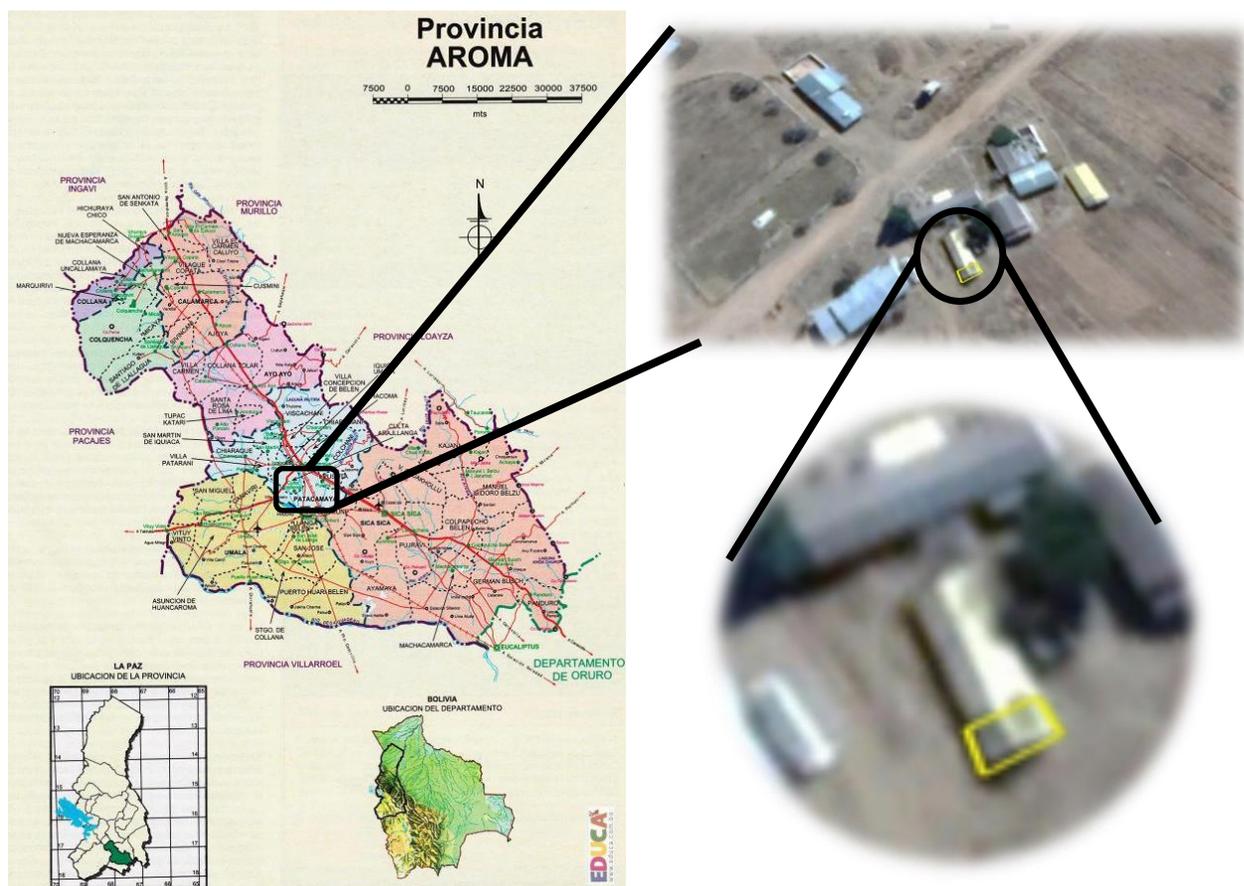
Torrente (2013), Indica que Arduino son tres cosas. Una placa hardware libre que incorpora un microcontrolador reprogramable y una serie de pines hembra que permiten conectar allí de forma muy sencilla y cómoda diferentes sensores y actuadores. Un Software (más concreto, un “entorno de desarrollo”) gratis, libre y multiplataforma que se debe instalar en el ordenador y que permite escribir, verificar y guardar (cargar) en la memoria del microcontrolador de la placa Arduino en conjunto de instrucciones que deseamos que empiece a ejecutar. Un lenguaje de programación libre. Por “Lenguaje de programación” se entiende cualquier idioma artificial para expresar instrucciones que pueden ser llevadas a cabo por máquinas. Concretamente dentro del lenguaje Arduino, encontramos elementos parecidos a muchos otros lenguajes de programación existentes, así como también diferentes comandos que nos permiten especificar de una forma coherente y sin errores las instrucciones exactas que queremos programar en el micro controlador de la placa. Estos comandos se escriben mediante el entorno de desarrollo Arduino.

Las instrucciones para ser ejecutadas por el Arduino son escritas en Sketch y son cargadas desde el ordenador hasta la placa Arduino mediante el cable USB que posee para que trabaje de forma autómatas y puede alimentarse de energía por el mismo cable USB, o baterías de 9 V, o transformadores a corriente continua que oscilen de 5 V hasta máximo de 20 Voltios.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Localización

El presente trabajo se realizó en el centro experimental de Patacamaya perteneciente a la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés que se encuentra en el Departamento de La Paz, provincia Aroma, Municipio de Patacamaya. Ubicado a 17° 15' 40" latitud sur y 67° 56' 37" longitud oeste con una altitud de 3798 m.s.n.m. y dista a 88 km de la ciudad de La Paz (Google Earth, 2017).



Fuente: [www.educa.com.bo](http://www.educa.com.bo)

Fuente: Elaboración propia con imágenes de Google Earth

Figura 3. Mapa de ubicación del centro experimental de Patacamaya de la UMSA

#### 3.1.1. Clima

La región se caracteriza por presentar dos tipos de épocas, la época seca que comprende los meses de abril a septiembre, y la época húmeda que comprende los meses octubre a marzo (PDM, 2012).

### **3.1.2. Temperatura**

El municipio de Patacamaya registra una temperatura máxima de 21,2 °C y una mínima de -5,2 °C, con una temperatura media de 9,7 °C (PDM, 2012).

### **3.1.3. Precipitación**

La precipitación anual de la zona es de 414 mm, siendo los meses de septiembre a marzo que presentan mayor frecuencia de precipitación. El mes con mayor intensidad de precipitación es enero con 102,2 mm (PDM, 2012).

### **3.1.4. Humedad relativa**

La humedad relativa media en la época seca de la zona es del 45 %, incrementándose en los meses de enero, febrero y marzo a 60 % de humedad (PDM, 2012).

## **3.2. Materiales**

Los materiales que fueron utilizados para realizar la investigación fueron los siguientes.

### **3.2.1. Material biológico**

- Esquejes de álamo (*Populus deltoides* L.)
- Hojas de sauces (*Salix* sp)

El material biológico se obtuvo de los ejemplares de álamo y sauce que posee la Estación Experimental de Patacamaya.

### **3.2.2. Materiales de campo**

- Tijeras de podar
- Cámara fotográfica
- Termo-Higrómetro
- Arduino UNO y sensor de humedad de suelo YI – 69
- Bomba de agua de 0,5 Hp
- Bomba de agua de 0,8 Watts
- Agrofil

- Tuberías de PVC de 1", 3/4" y 1/2"
- Conectores de tanque de 1/2"
- Codos de 3/4" y 1/2"
- Coples de 3/4" y 1/2"
- Niples de 1/2"
- Unión universal de 1", 3/4" y 1/2"
- Mangueras de 1", 3/4" y 1/2"
- Tanque de agua de 300 l
- Politubos de 3/4"
- Nebulizadores Green mist

### **3.2.3. Material de construcción**

- Techo de policarbonato
- Ladrillos
- Cemento

### **3.2.4. Material de laboratorio**

- Balanza analítica
- Probeta
- Mufla

### **3.2.5. Material de gabinete**

- Tablero de campo
- Planillas para la toma de datos
- Software estadístico InfoStat

## **3.3. Método**

El presente trabajo se realizó en una carpa, posibilitando modificar las condiciones de temperatura y humedad relativa del interior. El experimento se desarrolló desde el 19 de

diciembre del 2016 hasta el 28 de abril del 2017, es decir, tuvo una duración de 4 meses, de los cuales 1 mes fue destinado para la construcción de la cámara de irrigación capilar y 3 meses para la plantación, desarrollo de los esquejes hasta el momento del repique de los mismos en bolsas plásticas.

### **3.3.1. Construcción del sistema de irrigación capilar y nebulización**

#### **3.3.1.1. Cámara de irrigación capilar y cama de propagación**

El experimento se realizó en cámaras de sub-irrigación las cuales fueron construidas con ladrillo. Dos cámaras de sub-irrigación poseían las siguientes dimensiones 3,2 m de largo, 1,1 m de ancho y 0,6 m de alto, y las dimensiones de una tercera cámara fue de 3 m de largo, 1 m de ancho y 0,6 m de alto.

Se impermeabilizaron las bases de las cámaras de irrigación capilar con 3 capas de agrofíl, posteriormente se procedió a poner los estratos de piedras, grava, arena fina y el sustrato de arena y turba, formando este último la cama de propagación de esquejes (Quinteros, 2014). Las cámaras impermeabilizadas fueron provistas de alimentadores de agua contruidos con tuberías y accesorios de  $\frac{3}{4}$ " de diámetro que atravesaban todos los estratos de las cámaras llegando hasta las bases de las cámaras de agua.

#### **3.3.1.2. Medidor de nivel de agua**

Los niveles de agua que poseían las cámaras de irrigación fueron observadas por medio de los medidores de agua que fueron contruidos con los accesorios de PVC de  $\frac{1}{2}$ ", conectores de tanque, codos, coples, niples y manguera transparente mediante esta, se observaba la altura a la cual se encontraba el agua en el interior de la cámara de irrigación capilar.

#### **3.3.1.3. Sistema de circulación de agua**

Las cámaras que poseían el sistema de riego capilar contaban con un sistema de circulación de agua, los cuales fueron instalados a los extremos de los tubos de alimentación de agua. Dicho sistema constituía de un conector de tanque que salía de la cámara, conectada a una bomba de agua de 0,8 watts por medio de una manguera de 1" de diámetro sujetos por abrazaderas. La bomba de agua cumplía la función de hacer

circular el agua contenida en el interior de la cámara de irrigación, elevándola por una manguera de ¾” de diámetro hasta el tubo de alimentación de dicha cámara.

Este sistema de circulación de agua se instaló a causa de la pudrición que sufrió el agua contenida en las cámaras de almacenamiento de agua.

#### **3.3.1.4. Sistema de nebulización**

Se instaló un sistema de nebulización con micro aspersores super fogger para reducir la temperatura e incrementar la humedad relativa. Dicho sistema se instaló sobre las camas de propagación conectados a una bomba de 0,5 Hp y un tanque con capacidad de 300 litros de volumen.

#### **3.3.2. Preparación de los enraizadores naturales**

Se recolectaron hojas de un sauce encontrado en la Estación Experimental de Patacamaya, para obtener los extractos de las hojas de sauce se siguió dos procesos distintos en los cuales se consideró la dosis de 1 kg de hojas por 2 litros de agua. El primer proceso consistió de la molienda de las hojas de sauce, para la segunda forma se preparó una infusión con las hojas del sauce.

Quispe (2013) recomienda, después de preparar los extractos dejar reposar 24 horas. Se esperó el tiempo recomendado y luego se puso a remojar los esquejes de álamo recolectados en los extractos preparados durante otras 24 horas.

#### **3.3.3. Recolección de esquejes**

Los esquejes fueron recolectados de árboles de álamo (*Populus deltoides*) encontrados dentro de la Estación Experimental de Patacamaya, estos fueron tomados de las copas de los álamos con la ayuda de las tijeras de podar.

##### **3.3.3.1. Longitud de corte de los esquejes**

La longitud de corte de los esquejes fue de 15 cm, considerando que su diámetro sea como el de un lápiz. El corte apical se realizó en bisel, en sentido contrario a la última yema para evitar la acumulación de gotas de agua que provocarían la pudrición del ápice (Centellas *et al.*, 2011). Para realizar el corte se tomó en cuenta que cada esqueje conste de 4 yemas.

### **3.3.3.2. Defoliación y tratamiento de los esquejes**

Los esquejes recolectados fueron defoliados, dejándolos con una hoja para facilitar que la planta respire y así disminuir la pérdida de agua (Mindreau *et al.* 2010). Posteriormente se introdujo los esquejes en los extractos de sauce por 24 horas en un ambiente de sombra bien ventilada.

### **3.3.4. Desinfección de sustrato**

En la presente investigación se consideró trabajar con el sustrato recomendado por Quinteros (2014), conformado de turba y arena en la relación 1:1.

El sustrato se desinfectó con una solución de formol de concentración 1 l por cada 10 l de agua. La solución se distribuyó con una regadera sobre el sustrato puesto en las camas de propagación. Al terminar la operación se recubrió con bolsa plástica las camas de propagación para evitar que los gases producidos se evaporen, manteniéndolos recubiertos por el periodo de 48 horas posteriormente se retiró la cubierta y removió el sustrato para realizar la plantación.

### **3.3.5. Plantación de esqueje**

Los esquejes fueron plantados el 27 de enero del 2017, después de ser sometidos a los extractos de sauce. Se consideró como marco de plantación 10 x 10 cm, enterrando 2 yemas de la parte basal, dejando al exterior las otras 2 yemas, cuidando que la altura sobresaliente de los esquejes fuera 7,5 cm.

### **3.3.6. Manejo del sistema de irrigación capilar**

Mediante los tubos de alimentación provistos en las camas de propagación se fue añadiendo agua cada dos semanas, la cantidad de agua aplicada era de 50 l en cada cama. Esta actividad fue realizada con la ayuda de un medidor de agua domiciliario con el que se verificaba la cantidad de agua aplicada que ingresaba a las cámaras de sub-irrigación. Para verificar que las cámaras de sub-irrigación contuvieran agua se observaba a través de los medidores de agua.

La cama que poseía el riego tradicional, también se aplicaba los 50 l de agua con la ayuda de una regadera acoplada a la manguera que poseía el medidor de agua, pero este volumen fue repartido en seis aplicaciones cada dos semanas.

### 3.3.7. Manejo del sistema de circulación

Se efectuaba la circulación del agua contenida en las cámaras de sub-irrigación dos días por semana durante media hora, para evitar que el agua suspendida se pudra y así el agua se mantenga oxigenada.

### 3.3.8. Manejo del sistema de nebulización

Cuando la temperatura superaba los 40 °C y la humedad relativa era inferior al 35 % se encendía el sistema de nebulización de forma manual. El agua para enfriar el ambiente era aplicado con los micro aspersores super fogger dispuestos por encima de las camas de propagación, estos proveían el agua en forma de niebla y era impulsado por una bomba de agua centrifuga de 0,5 Hp, el sistema se encendía hasta tratar de enfriar el ambiente, llegando a regularlo con temperaturas de 20 a 25 °C y la humedad relativa se encuentre al 40 a 55 %. Para apagar la bomba de agua se procedía a ver la temperatura y humedad relativa registrada por el termómetro e higrómetro.

### 3.3.9. Diseño experimental

La investigación se realizó en un diseño completamente al azar con arreglo en parcelas divididas con dos factores. Siendo el factor A la altura del tanque de sub-irrigación y el factor B la forma de extracto de las hojas de sauce. El modelo aditivo lineal utilizado es dado por la ecuación 2.

$$X_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ik} + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2)$$

Donde:  $X_{ij}$ , es una observación cualquiera

$\mu$ , es la media general

$\alpha_i$ , es el efecto del factor A (Tipo de riego)

$\varepsilon_{ik}$ , es el error experimental de la parcela mayor (E A)

$\beta_j$ , es el efecto del factor B (Forma de extracto)

$\alpha\beta_{ij}$ , es la interacción entre A y B (Tipo de riego x Forma de extracto)

$\varepsilon_{ijk}$ , es el error experimental de la parcela menor (E B)

El cuadro 3, muestra los diferentes niveles de los factores que se consideraron para llevar a cabo la investigación.

**Cuadro 3.** Factores considerados y sus respectivos niveles en estudio

<b>Factor A</b>	<b>Factor B</b>
<b>Tipo de riego</b>	<b>Forma de extracto</b>
Riego tradicional	Extracto molido
Riego capilar (Altura de tanque 10 cm)	Extracto infusión
Riego capilar (Altura de tanque 20 cm)	

**Fuente:** Elaboración propia

Se trabajó con seis tratamientos, resultado por la combinación de los niveles de los factores considerados y tres repeticiones que se describen a continuación.

**T1** = Tradicional \* Molido

**T3** = 10 cm \* Molido

**T5** = 20 cm \* Molido

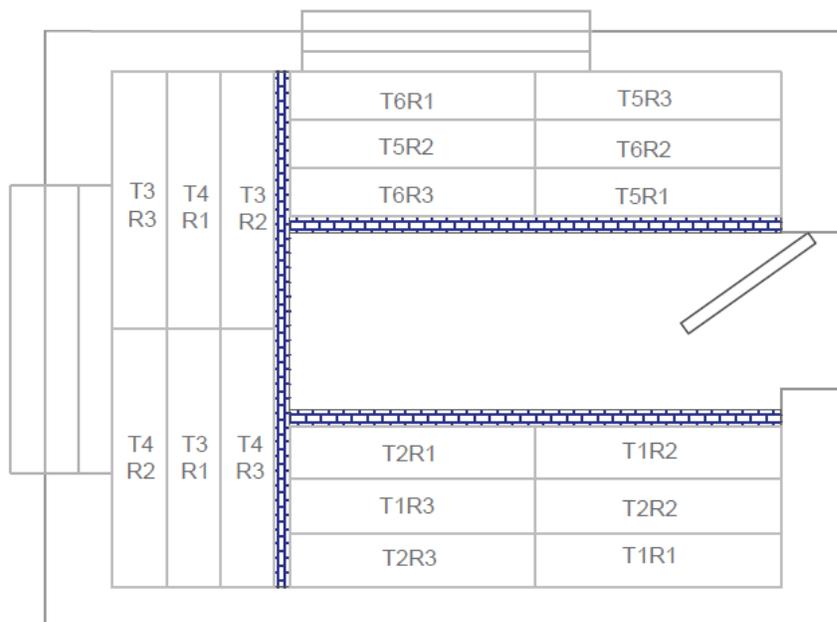
**T2** = Tradicional \* Infusión

**T4** = 10 cm \* Infusión

**T6** = 20 cm \* Infusión

### 3.3.10. Croquis del diseño

La figura 4, muestra la forma de distribución de las unidades experimentales con el que se trabajó durante la investigación.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4.** Distribución de las unidades experimentales en campo

### **3.3. Variables de respuesta**

Para evaluar la presente investigación se consideraron las siguientes variables de respuesta:

#### **3.4.1. Temperatura y humedad relativa**

Se registró cada semana las temperaturas máxima, mínima y media, y la humedad relativa del interior de la carpa, durante las trece semanas que permaneció el experimento. Dichos datos fueron observados con un termómetro e higrómetro que estaba ubicada en la parte central de la carpa.

#### **3.4.2. Humedad del sustrato**

La humedad del sustrato fue medida con el sensor de humedad de suelo YI – 69, que fue ensamblado al controlador Arduino UNO, junto con la pantalla LCD previamente programado con el sketch recomendado por García (2014). El registro de la humedad del sustrato fue realizado cada semana.

Previo al registro de datos de humedad de suelo con el sensor YI – 69, se efectuó la calibración del sensor de humedad considerando distintas humedades gravimétricas hasta conseguir que el sustrato llegue al estado de saturación. En este proceso se registraron las lecturas de humedad realizadas con el Arduino UNO a las distintas humedades gravimétricas, posteriormente con estos valores registrados se determinó la ecuación de regresión de mejor ajuste como se ve en el anexo 2.

#### **3.4.3. Porcentaje de prendimiento**

El porcentaje de prendimiento se evaluó al finalizar el experimento, para esta variable se consideró solamente los esquejes que formaron raíces en el momento del repique.

#### **3.4.4. Número de raíces**

Se realizó el conteo del número de raíces que desarrollaron los esquejes de álamo en las camas de propagación al concluir el trabajo de investigación.

#### **3.4.5. Longitud de raíz**

La longitud de las raíces fueron medidas en el momento del repique, para este fin se consideró la longitud desde la primera raíz formada en la parte basal de los esquejes

hasta la punta terminal de la raíz extendida. Las mediciones correspondientes fueron realizadas con una regla.

#### **3.4.6. Altura de planta**

Se registró la altura de planta con la ayuda de una regla, se dio seguimiento a esta variable cada semana. La misma se consideró medir con la regla desde la base del esqueje que sobresale en el sustrato, hasta la parte más alta alcanzada por los brotes del álamo.

#### **3.4.7. Número de hojas**

Por medio de conteo simple se registró cada semana el número de hojas que desarrollaron los esquejes de álamo.

#### **3.4.8. Costos parciales de producción**

El costo de producción identifica la cantidad de dinero que se debe calcular para cubrir el proceso de producción o de comercialización, considerando todos los costos implicados en dichos procesos (ProMéxico, 2010). Se realizó el cálculo de los costos parciales de producción de los esquejes de álamo para cada forma de riego con los que se trabajó en el presente trabajo.

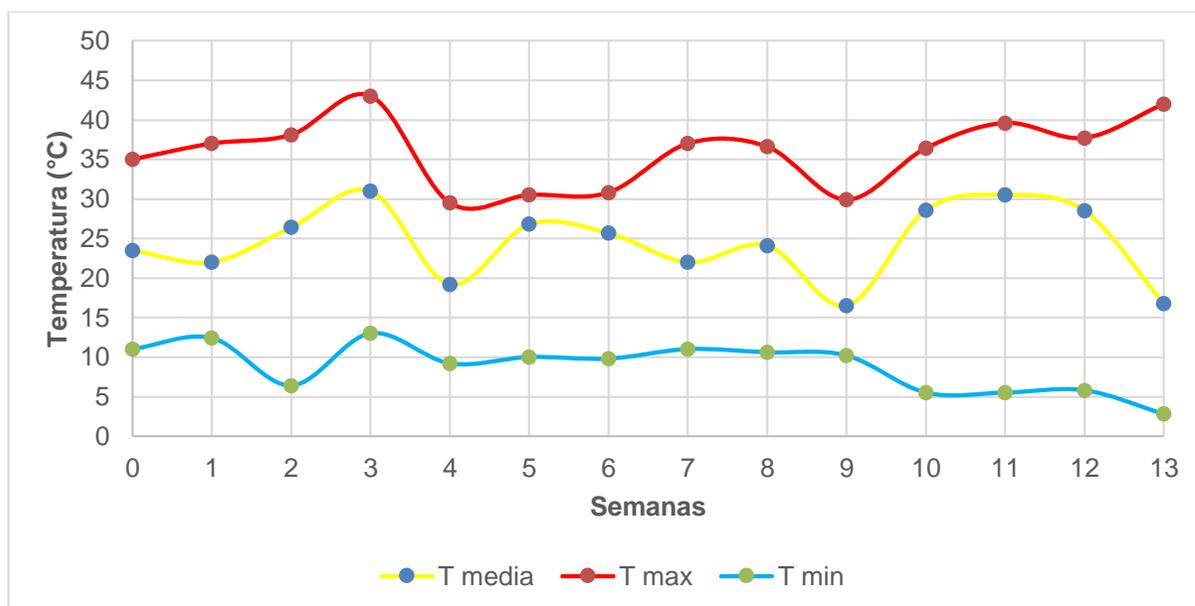
La obtención del costo de producción, considera los costos variables que son aquellos gastos que aumentan o disminuyen de manera proporcional a las variaciones de volumen de producción o prestación de un servicio, y los costos fijos que permanecen constantes o casi constantes independientemente de los cambios en los volúmenes de producción y venta (Draier *et al.*, 2013).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1. Temperatura y humedad relativa

La figura 5, muestra el comportamiento de la temperatura en el interior de la carpa durante las trece semanas que duró el experimento. Se puede ver que logró alcanzar temperaturas máximas desde 29,5 °C hasta 43 °C en los meses de febrero y abril correspondientemente, los cuales pudieron provocar efectos sobre el prendimiento y desarrollo de los esquejes de álamo, por tal motivo se reducía la temperatura utilizando nebulizadores para evitar que los esquejes pierdan agua por transpiración. Respecto a las temperaturas mínimas, estas llegaron a registrar valores que variaron de 2,8 a 13 °C registrados en los meses de abril y febrero respectivamente.

Quinteros (2014) trabajó con cámaras de sub-irrigación construidas con madera y plástico transparente donde las temperaturas máximas y mínimas alcanzaron variaciones de 21 a 27 °C y 9,4 a 8,9 °C respectivamente. Debido a que las camas de propagación fueron construidas con ladrillo en el interior de una carpa cuyo techo era de policarbonato pudo afectar las variaciones térmicas del ambiente.

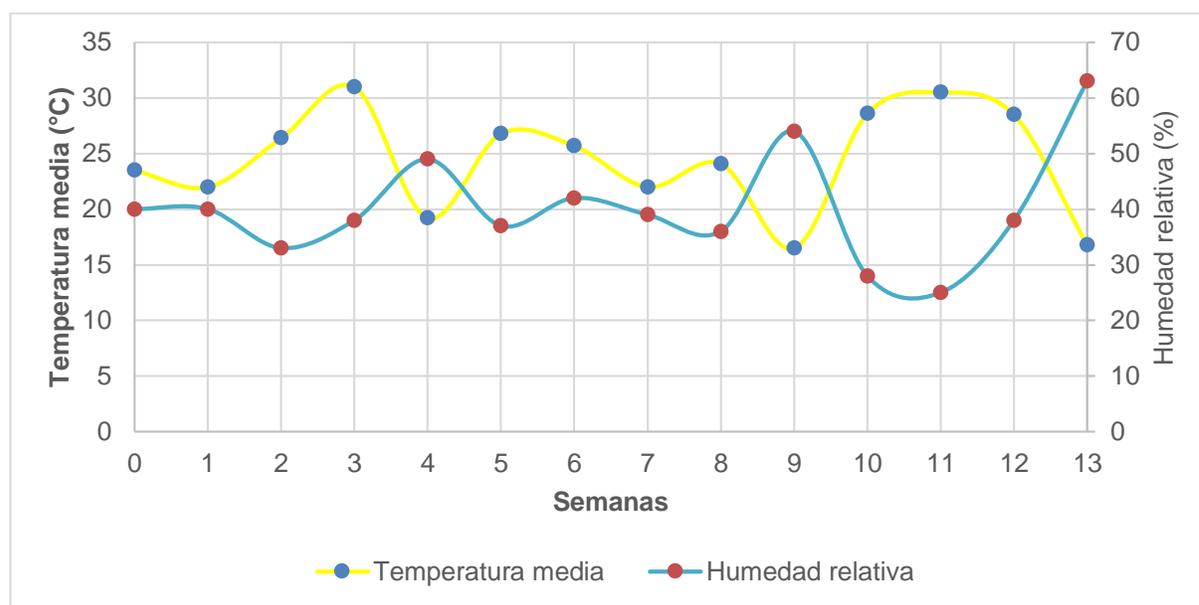


Fuente: Elaboración propia con base las temperaturas registrados por el termómetro e higrómetro del Centro Experimental de Patacamaya

Figura 5. Fluctuación de las temperaturas máxima, media y mínima

La comparación de la temperatura media con la humedad relativa que se registró durante todo el experimento se muestra en la figura 6, se puede observar que en la semana 3 se registró la temperatura de 31 °C el cual podría haber provocado un estrés hídrico en los esquejes a través de la transpiración, en las semanas posteriores se registraron temperaturas próximas a 23 °C. Morgan (2013), considera que los esquejes de tallo suave arraigarán más fácilmente si se les proporciona una temperatura de 15 a 20 °C.

Respecto a la humedad relativa de las primeras 8 semanas, se observa ver que en promedio se encontraba con 39,3 %, esto puede producir una alta tasa de transpiración en los esquejes y evaporación del agua de las camas de propagación. Las bajas humedades relativas del ambiente pudieron repercutir sobre el desarrollo de los esquejes de álamo debido a que fueron inferiores a la humedad relativa recomendada para realizar una propagación vegetativa, siendo esta del 80 % (Vásquez, 2001).



**Fuente:** Elaboración propia con base las temperaturas media y humedad relativa registrados con el termómetro e higrómetro del Centro Experimental de Patacamaya

**Figura 6.** Comportamiento de la temperatura media y la humedad relativa en el interior de la carpa

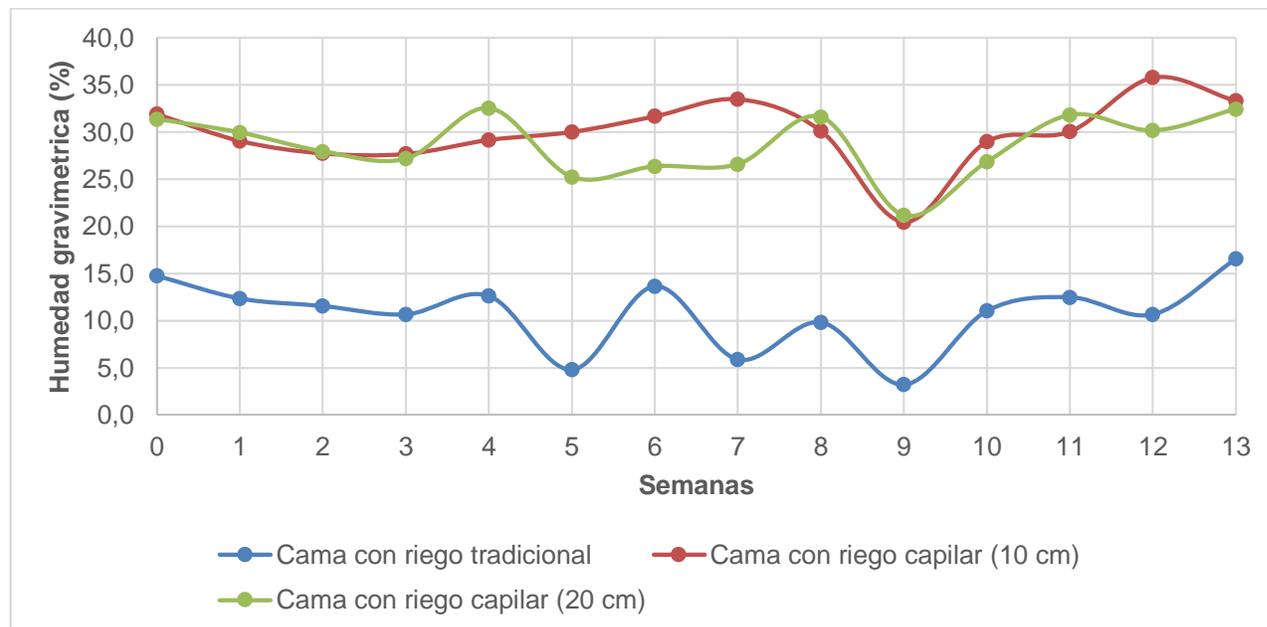
#### 4.2. Extracto de sauce

En el proceso de preparar el extractos de sauce, los componentes orgánicos presentes en las hojas pueden sufrir cambios en el proceso de maceración e infusión por los cuales

fueron sometidos al preparar los extractos (Tinco, 2013). Según Lima *et al.* (2010), mencionan los principales sitios de síntesis de auxinas son los tejidos meristemáticos de órganos aéreos, tales como yemas en brote, hojas jóvenes, extremos de raíz y flores o inflorescencias en crecimiento. Su concentración puede variar bastante de un tejido a otro. Sin embargo las auxinas sintetizadas de forma natural no se acumulan en grandes cantidades y sufren una inactivación debido a factores como la oxidación.

Medina (2016), determinó que la concentración de auxinas en el extracto de sauce (*Salix chilensis*) liofilizado es de 0,0342 %, siendo bajo respecto a las concentraciones de los enraizantes químicos comerciales como Stim root 3, Rapid root, Radix @1500 y Root-Hor que poseen auxinas como el Ácido Indol-3-Butirico en concentraciones de 0,8; 0,3; 0,15 y 0,1 % respectivamente. Algunas fitohormonas se degradan por efecto de las elevadas temperaturas (Ueguchi-Tanaka *et al.*, 2007), citado por (Cruz *et al.*, 2010).

#### 4.3. Humedad del sustrato

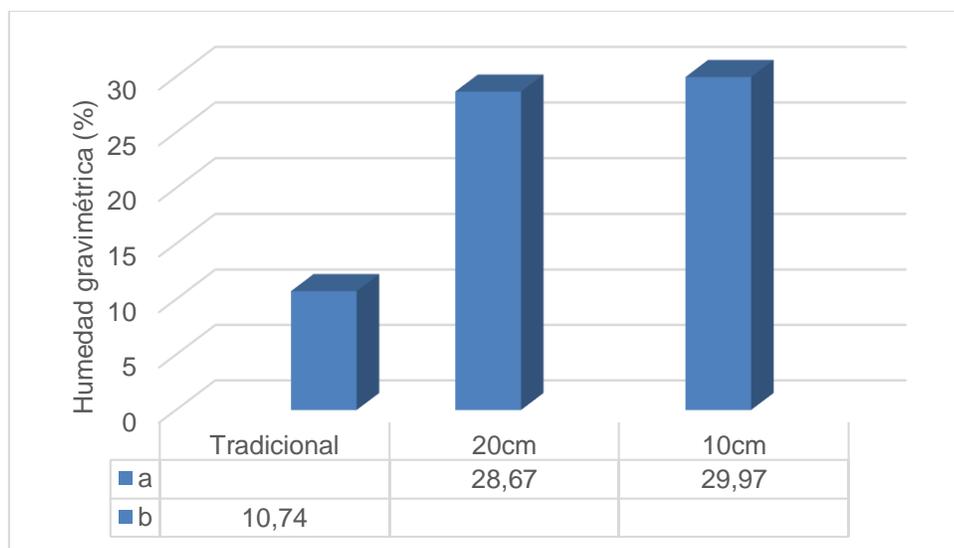


**Fuente:** Elaboración propia con base a los valores transformados de la lectura de humedad de suelo del sensor de humedad de suelo YI – 69

**Figura 7.** Comparación de las humedades gravimétricas de los sustratos en las camas de propagación

Los valores registrados por el sensor de humedad de suelo YI – 69 se muestra en la figura 7, donde se puede observar los valores transformados a humedades gravimétricas, los valores obtenidos por el sensor YI – 69 y leídos por el Arduino UNO se muestra en el anexo 2. Los sistemas de sub-irrigación tienden a elevar los valores de la conductividad eléctrica (CE) en las regiones superiores del medio contenedor. La alta conductividad eléctrica resulta de la evaporación del agua en la superficie del medio que deja las sales solubles (Dumroese *et al.*, 2006, 2011; Landis, 1998), citado por (Schmal *et al.*, 2011), esto podría haber afectado las lecturas llevadas a cabo con el sensor de humedad.

Los comportamientos de las humedades gravimétricas de las camas de propagación con riego capilar de 10 cm y 20 cm de altura se encuentran entre 35,8 y 20,5 % como se ve en la figura 7, esto debido a que las mencionadas camas poseen las cámaras que sub-irrigación, donde el agua está suspendida entre la base de las camas de propagación y los estratos del sustrato de forma que el agua asciende hacia la superficie del sustrato por efecto de la capilaridad. Además el sustrato poseía 50 % de arena lo que le da mayor porosidad evitando así el ascenso rápido del agua hacia la superficie y posteriormente su evaporación.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 8.** Comparación Duncan  $\alpha = 0,05$  realizada para la humedad del sustrato

La altura de la cámara de sub-irrigación no muestra diferencia significativa en la humedad del sustrato como se ve en la figura 8, donde se presenta los resultados de la

comparación Duncan para la Humedad gravimétrica del sustrato. Sugiere que el agua que asciende por capilaridad hacia las raíces de los esquejes tiene relación directa con agua almacenada y no así con las dimensiones que posee la cámara de sub-irrigación donde se suspende el agua.

La cama con riego tradicional presenta valores de humedad gravimétrica de 3,2 a 16,6 %, valores relativamente bajos que pudo afectar en el crecimiento de los esquejes de álamo, igualmente pudo tener repercusiones en el porcentaje de prendimiento, número de raíces y longitud de raíz.

#### 4.4. Variables de respuesta

El respectivo análisis de los resultados obtenidos en el presente trabajo se presenta a continuación.

##### 4.4.1. Porcentaje de prendimiento

**Cuadro 4.** Análisis de varianza para el porcentaje de prendimiento

F.V.	SC	GI	CM	F	p-valor
<b>Riego</b>	0,48	2	0,24	19,53	0,0024 **
<b>Error (Riego)</b>	0,07	6	0,01		
<b>Extracto</b>	0,01	1	0,01	0,92	0,3735 NS
<b>Riego*Extracto</b>	0,01	2	0,01	0,53	0,6125 NS
<b>Error</b>	0,07	6	0,01		
<b>Total</b>	0,65	17			

Fuente: Elaboración propia

$$CV_{Riego} = 23,33 \%$$

$$CV_{Extracto} = 23,33 \%$$

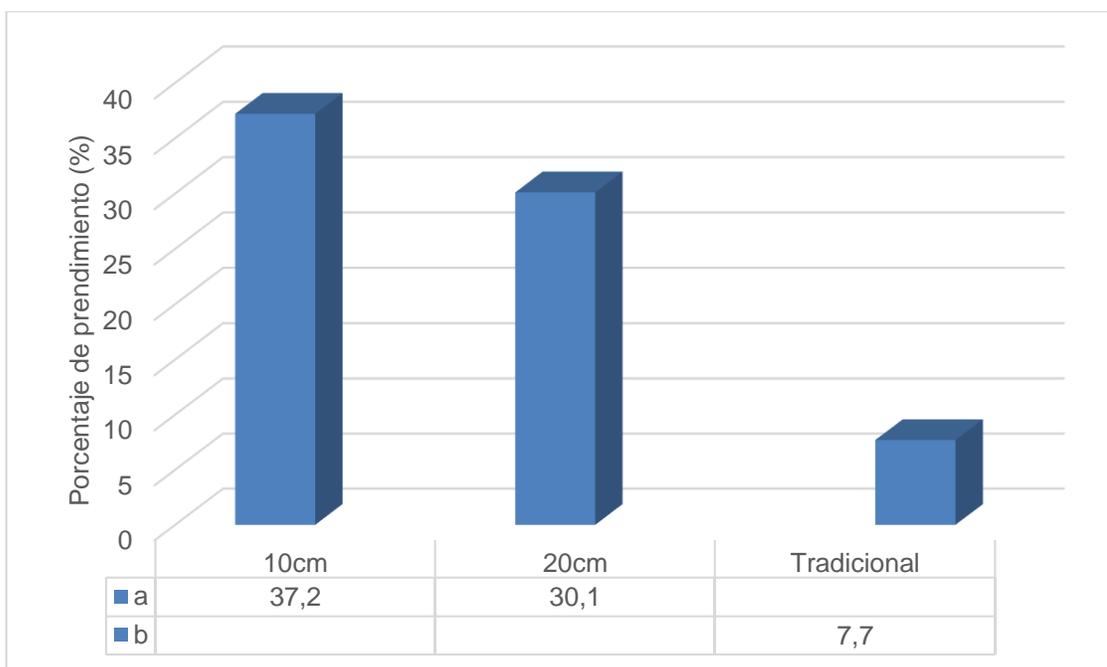
El cuadro 4, muestra el análisis de varianza de la variable porcentaje de prendimiento, donde se obtuvo para el factor extracto y la interacción resultados no significativos, indicando que el modo de preparar el extracto de sauce no tiene efecto sobre el prendimiento de las estacas de álamo, así como también la interacción entre forma de riego y la forma de procesar las hojas de sauce. El coeficiente de variabilidad de los factores de riego y extracto es de 23,33 % el cual indica que las unidades experimentales fueron manejadas de forma regular.

Por otro lado se presentó un resultado altamente significativo para el factor riego, el cual implica que la forma de riego tiene efecto directo sobre el prendimiento de los esquejes de álamo, es decir, la forma en la cual es aplicado el riego presenta efectos sobre el prendimiento de los esquejes de álamo

**Cuadro 5.** Prueba de Duncan del porcentaje de prendimiento para el factor riego

Tratamiento	Promedio (%)	Desviación estándar	Duncan $\alpha = 0,05$
10cm	37,2	12,13	a
20cm	30,1	10,30	a
Tradicional	7,7	3,15	b

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

**Figura 9.** Porcentaje de prendimiento promedio alcanzado de esquejes de álamo para el factor riego

Realizando una comparación de Duncan para los promedios del factor riego, se observa en el cuadro 5, que el riego tradicional obtuvo el menor porcentaje de prendimiento 7,7 % y los riegos capilares lograron tener los porcentajes de prendimiento promedio iguales para el comparador Duncan con los esquejes de álamo 37,2 % y 30,1 % superior respecto

al riego tradicional. En la figura 9 se puede distinguir el mayor porcentaje de prendimiento promedio alcanzado por los esquejes que se desarrollaron en la cama de propagación que poseía el tanque de almacenamiento de agua de 10 cm de altura, siendo este del 37,2 %.

En trabajos realizados en cámaras de sub-irrigación por Quinteros (2014) con esquejes de queñua (*Polilepis besseri* y *P. tarapacana*) bajo condiciones similares del sustrato utilizado en la proporción de 50 % turba y 50 % arena, y, Miranda (2016) con esquejes de eucalipto (*Eucalyptus viminalis*) sometidos en agua de coco como enraizador natural, lograron obtener un porcentaje de prendimiento promedio del 24,5 % y 24,75 % respectivamente. Los anteriores resultados mencionados sugieren que la causa del bajo porcentaje de prendimiento de los esquejes de álamo podría ser a causa del exceso de agua en las cámaras de sub-irrigación y una falta de drenaje en el sustrato.

#### 4.4.2. Número de raíces

**Cuadro 6.** Análisis de varianza del número de raíces

F.V.	SC	GI	CM	F	p-valor
<b>Riego</b>	0,36	2	0,18	1,27	0,3473 NS
<b>Error (Riego)</b>	0,09	6	0,01		
<b>Extracto</b>	0,1	1	0,1	0,69	0,4394 NS
<b>Riego*Extracto</b>	0,02	2	0,01	0,08	0,9217 NS
<b>Error</b>	0,86	6	0,14		
<b>Total</b>	1,43	17			

Fuente: Elaboración propia

$$CV_{Riego} = 4,69 \%$$

$$CV_{Extracto} = 17,56 \%$$

El análisis de varianza del número de raíces, no presentó significancia en los resultados de los factores de riego, extracto y en la interacción de los mismos, como se ve en el cuadro 6, es decir, que el número de raíces promedio que lograron desarrollar los esquejes de álamo son estadísticamente iguales, por lo tanto la forma de preparar los

extractos de sauce y la forma en que se provee en agua a las camas de propagación a los esquejes de álamo no muestra resultados que se logren diferenciarse entre sí.

Por otro lado los coeficientes de variabilidad de los factores riego y extracto indican que hubo un buen manejo de las unidades experimentales debido a que el valor de los mismos son del 4,69 % y 17,56 % respectivamente. Al concluir el experimento los esquejes de álamo lograron desarrollar en promedio 7,6 raíces por esqueje, estudio realizado por Gutiérrez (2013) con ligustro utilizando extracto de sauce logró obtener 3 raíces por esqueje. Así mismo, esquejes de verónica tratados con extracto de sauce desarrollaron 7,8 raíces.

#### 4.4.3. Longitud de raíz

**Cuadro 7.** Análisis de varianza de la longitud de raíz

F.V.	SC	GI	CM	F	p-valor
<b>Riego</b>	84,81	2	42,41	27,81	0,0009 **
<b>Error (Riego)</b>	8,69	6	1,45		
<b>Extracto</b>	17,41	1	17,41	11,41	0,01490 *
<b>Riego*Extracto</b>	9,99	2	5	3,28	0,1093 NS
<b>Error</b>	9,15	6	1,53		
<b>Total</b>	130,05	17			

Fuente: Elaboración propia

$$CV_{Riego} = 12,54 \%$$

$$CV_{Extracto} = 12,88 \%$$

La longitud de raíz obtuvo el resultado altamente significativo para el factor riego como se ve en el cuadro 7, el cual indica que la forma de proveer de agua a los esquejes de álamo tiene relación directa sobre el crecimiento de las raíces. Además, se realizó un buen manejo de las unidades experimentales debido a que el valor del coeficiente de variabilidad de dicho factor es de 12,54 %

Entre tanto el factor extracto también posee el resultado significativo, es decir que la forma de preparación de los extractos presentan efectos sobre el crecimiento de las raíces, por lo tanto realizar un tratamiento de molido o infusión a las hojas de sauce logra obtener efectos diferenciados sobre el tamaño de las raíces de los esquejes de álamo.

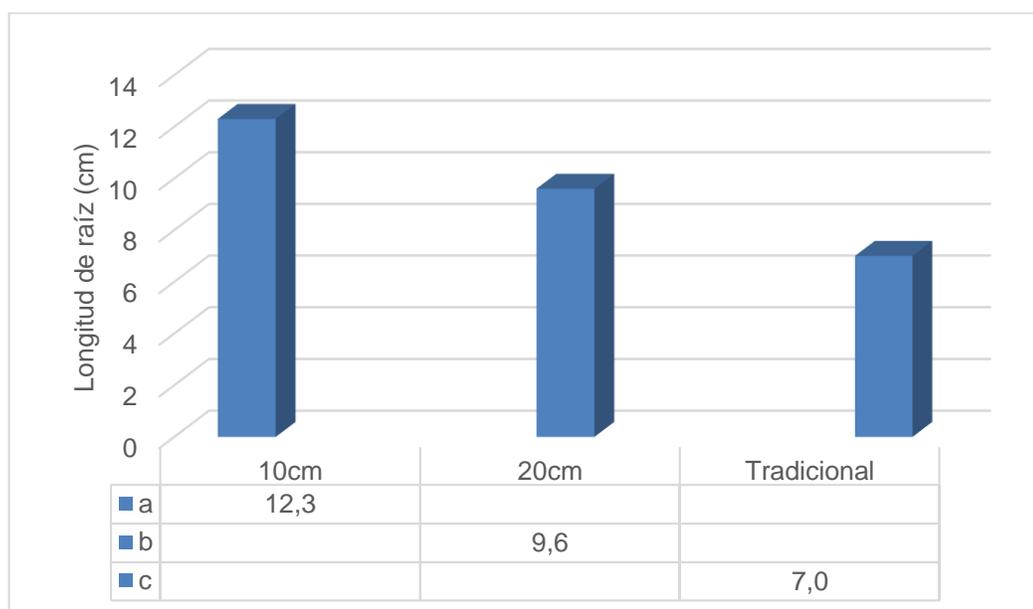
Como el coeficiente de variabilidad del factor extracto es 12,88 % se tiene que hubo un buen manejo de las unidades experimentales.

El resultado para los tratamientos no presentó significancia como se ve en el cuadro 7, por lo que la interacción entre el tipo de riego y la forma de preparación del extracto de sauce no llegó a mostrar diferencias sobre el tamaño de las raíces de los esquejes de álamo.

**Cuadro 8.** Prueba de Duncan de la longitud de raíz para el factor riego

Tratamiento	Promedio (cm)	Desviación estándar	Duncan $\alpha = 0,05$
<b>10cm</b>	12,3	1,25	a
<b>20cm</b>	9,6	1,47	b
<b>Tradicional</b>	7,0	2,31	c

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

**Figura 10.** Promedio de la longitud de raíces alcanzada para el factor riego

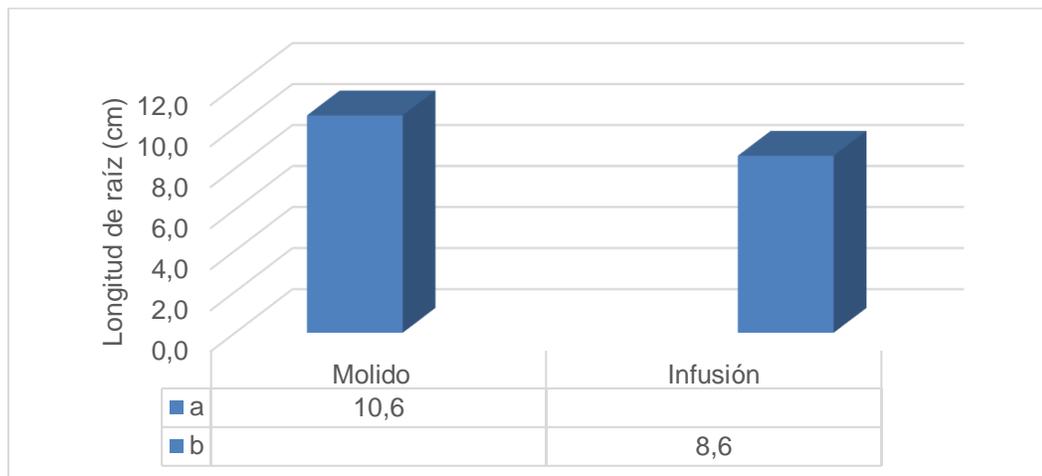
El cuadro 8, muestra que la cama de propagación que poseía la altura de 10 cm en la cámara de agua de riego capilar obtuvo la mayor longitud de raíz con 12,3 cm como promedio, seguido de la cama de 20 cm que logró que los esquejes de álamo tengan la

raíz de 9,6 cm de largo y en la cama que fue regada de forma tradicional los esquejes desarrollaron las raíces de menor tamaño 7,0 cm en promedio.

**Cuadro 9.** Prueba Duncan para la longitud de raíz del factor extracto

Tratamiento	Promedio (cm)	Desviación estándar	Duncan $\alpha = 0,05$
<b>Molido</b>	10,6	1,86	a
<b>Infusión</b>	8,6	3,25	b

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

**Figura 11.** Longitud de raíz promedio alcanzado para el factor extracto

El tamaño de las raíces de los esquejes de álamo sometidos a los extractos de sauce, fueron afectados por la forma de procesar las hojas de sauce para obtener dichos extractos. El cuadro 9, muestra la respectiva comparación de Duncan realizada para el factor extracto donde se observa, que la molienda de las hojas de sauce ejercieron mayor efecto sobre las esquejes de álamo logrando obtener las raíces más grandes 10,6 cm en promedio, en cambio el extracto obtenido realizando la infusión de las hojas de sauce llegaron a medir en promedio 8,6 cm de longitud.

Quispe (2013), logró obtener raíces con longitud de 10,25 cm en esquejes de queñua tratadas con extracto de sauce molido. En la figura 11, se ve que sometiendo los esquejes

de álamo en extractos de sauce molido logran desarrollar raíces de longitudes de mayor tamaño 10,6 cm, respecto a los esquejes tratados con la infusión de sauce. La obtención del extracto de sauce mediante una infusión podría haber destruido algunas fitohormonas termolábiles presentes en las hojas que afectaron en la elongación de las raíces.

#### 4.4.4. Altura de planta

**Cuadro 10.** Análisis de varianza de la altura de planta

F.V.	SC	Gl	CM	F	p-valor
<b>Riego</b>	25,48	2	12,74	40,23	0,0003 **
<b>Error (Riego)</b>	1,28	6	0,21		
<b>Extracto</b>	0,32	1	0,32	1,01	0,3536 NS
<b>Riego*Extracto</b>	1,08	2	0,54	1,71	0,2592 NS
<b>Error</b>	1,9	6	0,32		
<b>Total</b>	30,06	17			

Fuente: Elaboración propia

$$CV_{Riego} = 5,98 \%$$

$$CV_{Extracto} = 7,38 \%$$

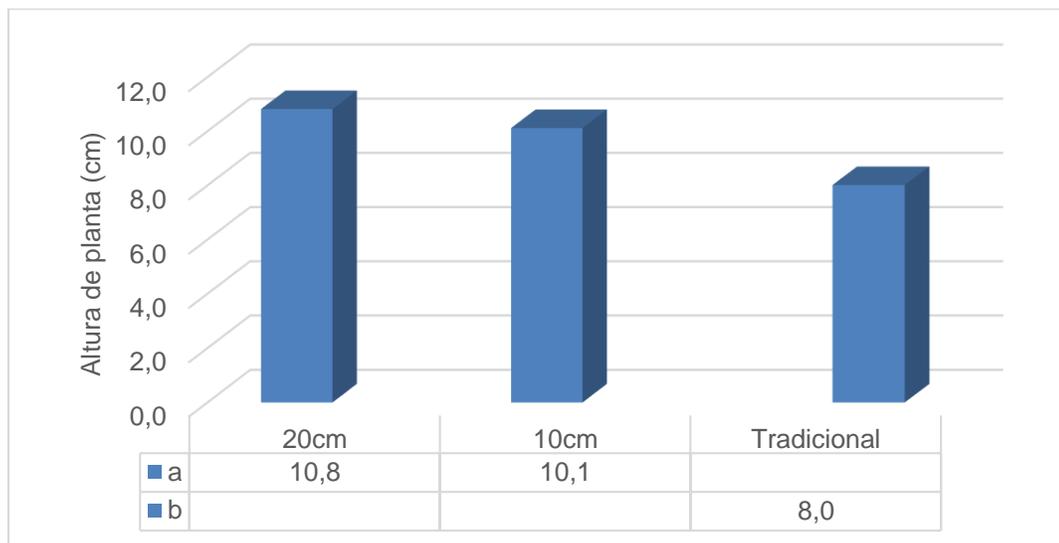
El factor riego posee el resultado altamente significativo que es mostrado en el cuadro 10, es decir que la altura de planta alcanzada al concluir el ensayo, fue influido por los tipos de riego con los cuales fueron provistos. Por otro lado el manejo de las unidades experimentales que tuvieron el factor riego fue bueno, debido a que el coeficiente de variabilidad de dicho factor es 5,98 %, esto sugiere que los resultados obtenidos con confiables.

Para la altura de planta los resultados del análisis de varianza muestran ser no significativos en el factor extracto como en la interacción, como se ve en el cuadro 10. Los resultados obtenidos indican que la forma de preparación de los extractos de sauce no presentan efectos estadísticamente diferentes sobre la altura de los esquejes de álamo que se logró obtener, de la misma forma la interacción del tipo de riego y la forma de preparación del extracto no tuvo resultados que se diferencien entre sí para la altura que alcanzaron los esquejes. El coeficiente de variabilidad del factor extracto es 7,38 % esto indica que las unidades experimentales fueron manejadas de forma adecuada.

**Cuadro 11.** Prueba Duncan para la altura de planta para el factor riego

Tratamiento	Promedio (cm)	Desviación estándar	Duncan $\alpha = 0,05$
20cm	10,8	0,32	a
10cm	10,1	0,87	a
Tradicional	8,0	0,25	b

Fuente: Elaboración propia



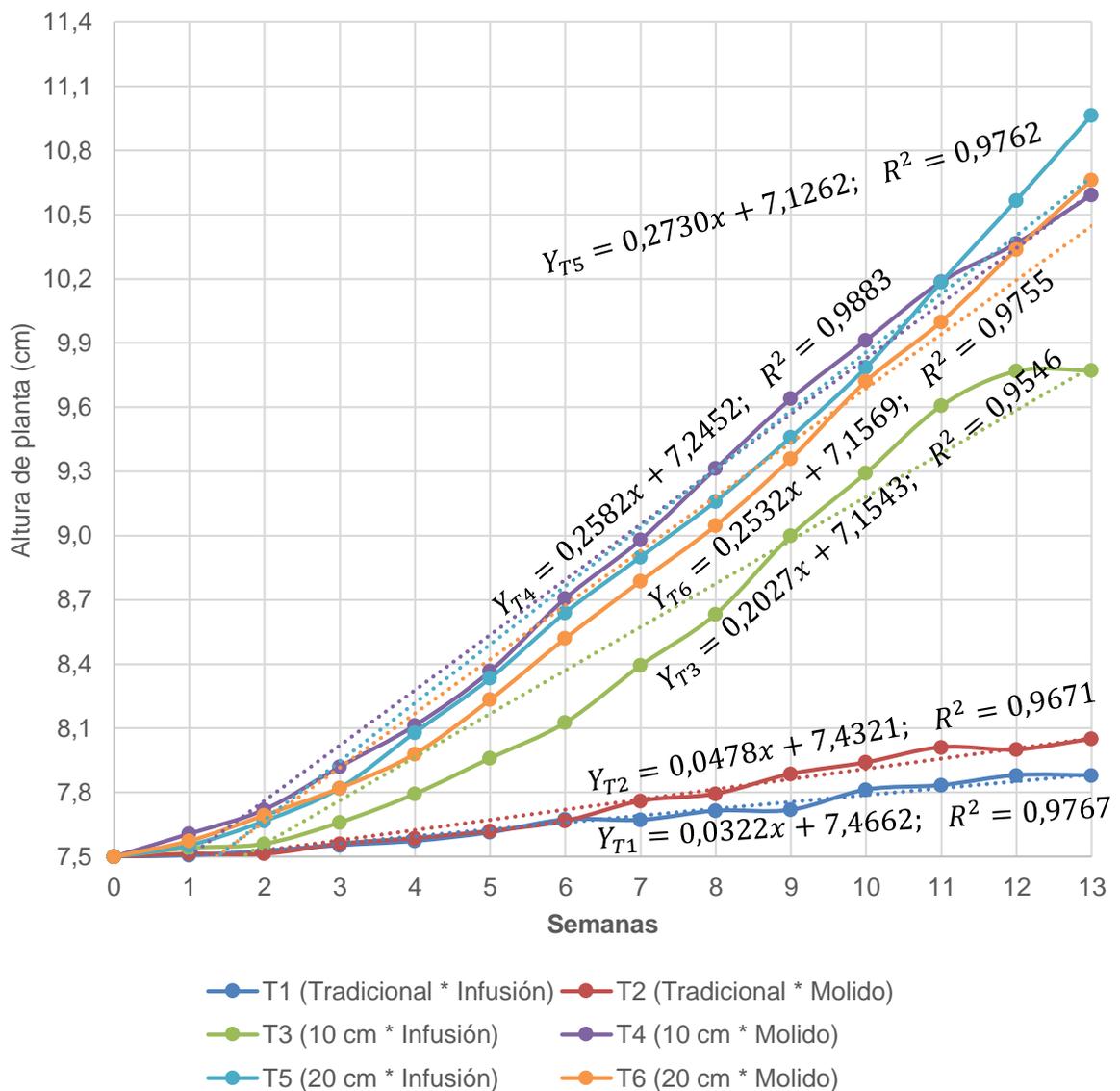
Fuente: Elaboración propia

**Figura 12.** Alturas de planta promedio alcanzadas para el factor riego

El cuadro 11, muestra el resultado del comparador Duncan obtenido para el factor riego de la variable altura de planta, el cual indica que las camas de propagación que se trató con alturas de 10 cm y 20 cm lograron obtener alturas estadísticamente iguales siendo las alturas alcanzadas de 10,1 cm y 10,8 cm respectivamente. El tipo de riego tradicional posee el menor valor del comparador Duncan por lo tanto los esquejes que fueron provistos con el riego tradicional tuvieron menor crecimiento logrando obtener 8,0 cm de alto como promedio como se muestra en la figura 12.

El estudio realizado con tres especies de álamo *Populus nigra*, *P. alba* y *P. balsamífera* por Cañaviri (2007), lograron alcanzar a registrar alturas promedio de 17,1 cm siendo tratadas con enraizadores químicos, esto sugiere que el desarrollo de los esquejes de álamo tuvo un óptimo crecimiento al ser tratadas con extractos de enraizado naturales.

El seguimiento del crecimiento que tuvieron los esquejes de álamo durante las 13 semanas que duró el experimento se observa en la figura 13, donde se ve que los tratamientos T3 (10 cm \* Infusión), T4 (10 cm \* Molido), T5 (20 cm \* Infusión) y T6 (20 cm \* Molido) presentan curvas de crecimiento por encima de los tratamientos T1 (Tradicional \* Infusión) y T2 (Tradicional \* Molido) a partir de la cuarta semana de desarrollo. Es decir, que las camas de propagación con irrigación capilar mostraron los efectos sobre el crecimiento de los esquejes en el primer mes después de la plantación de los esquejes.



Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Curvas de crecimiento de los esquejes de álamo

Realizando el análisis de ajuste de correlación y regresión con la variable altura de planta respecto a las semanas de desarrollo se tiene que el comportamiento del crecimiento de los esquejes de álamo tiene una alta correlación entre las semanas de desarrollo con la altura de crecimiento de los esquejes en estudio, llegando a tener valores de correlación iguales o superiores a 0,95 mostrando así que el crecimiento de los álamos puede ser representado por una ecuación de regresión lineal.

En las ecuaciones de regresión de los tratamientos 1 y 2 muestran una tasa de crecimiento del 0,0322 y 0,0478 cm por semana de desarrollo respectivamente, esto muestra que los esquejes de álamos que pertenecieron a estos tratamientos crecían a razón de menos de 1 mm en cada semana, como se nota en la figura 13. También se puede observar que los esquejes que fueron tratados en los tratamientos 3 y 4 mostraron tener tasas de crecimiento similares a los tratamientos 5 y 6, como se ve en las ecuaciones 3, 4, 5 y 6 de regresión lineal.

$$Y_{Trat3} = 0,2027x + 7,1543; R^2 = 0,9546 \quad (3)$$

$$Y_{Trat4} = 0,2582x + 7,2452; R^2 = 0,9883 \quad (4)$$

$$Y_{Trat5} = 0,2730x + 7,1262; R^2 = 0,9762 \quad (5)$$

$$Y_{Trat6} = 0,2532x + 7,1569; R^2 = 0,9755 \quad (6)$$

Las razones de crecimiento que presentaron tener los esquejes de álamo observados en los tratamientos 3, 4, 5 y 6 en relación a las semanas de desarrollo, son superiores respecto a los tratamientos 1 y 2. Los esquejes de dichos tratamientos presentan crecimientos por semana similar o superior a 2 mm, se puede ver que en este grupo de tratamientos los que obtuvieron la mayor tasa de crecimiento son los esquejes del tratamiento 5 con 0,2730 cm/semana y el tratamiento con el menor crecimiento semanal fue el tratamiento 3 con 0,2027 cm/semana. Los tratamientos 4 y 6 mostraron crecer 0,2582 y 0,2532 cm/semana respectivamente.

#### 4.4.5. Número de hojas

En el cuadro 12, se observa el resultado significativo para el factor riego, lo que indica que la cantidad de hojas que lograron formar los esquejes de álamo al terminar la investigación fue directamente influenciada por la forma de suministrar el agua a las camas de propagación, en cambio los valores de p para el factor extracto y la interacción son no significativos por lo que sugiere que las distintas formas de preparar los extractos no logran mostrar resultados diferentes, al igual que la interacción entre el tipo de riego y la forma de preparar los extractos.

**Cuadro 12.** Análisis de varianza del número de hojas

F.V.	SC	GI	CM	F	p-valor
<b>Riego</b>	0,72	2	0,36	5,36	0,0461 *
<b>Error (Riego)</b>	0,45	6	0,07		
<b>Extracto</b>	0,01	1	0,01	0,16	0,6999 NS
<b>Riego*Extracto</b>	0,18	2	0,09	1,35	0,3273 NS
<b>Error</b>	0,4	6	0,07		
<b>Total</b>	1,77	17			

Fuente: Elaboración propia

$$CV_{Riego} = 9,95 \%$$

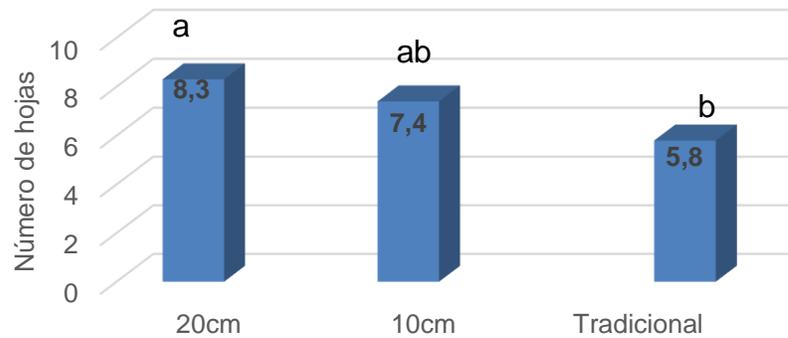
$$CV_{Extracto} = 9,95 \%$$

Tras realizar el análisis de varianza del número de hojas, se obtuvo los coeficientes de variabilidad de los factores de riego y extracto, ambos factores muestran el valor de 9,95 % el cual indica que se hizo un buen manejo de las unidades experimentales.

**Cuadro 13.** Prueba Duncan del número de hojas para el factor extracto

Tratamiento	Promedio	Desviación estándar	Duncan $\alpha = 0,05$
<b>20cm</b>	8,3	1,56	a
<b>10cm</b>	7,4	1,17	a b
<b>Tradicional</b>	5,8	1,37	b

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

**Figura 14.** Número de hojas desarrolladas promedio del factor riego

Realizando un análisis más detallado en el factor riego con una comparación Duncan se logra ver en el cuadro 13, que los esquejes que fueron tratadas en la cama de propagación con una altura de 20 cm, lograron alcanzar el mayor número de hojas por esqueje, en promedio lograron formar 8,3 hojas por esqueje. El trabajo realizado por Lucana (2014) con Álamo (*Populus balsamífera*) logro desarrollar 3,25 hojas en sustrato compuesto de turba, arena fina y tierra.

#### 4.4.6. Costos parciales de producción

El detalle de los costos de producción de la propagación esquejes de álamo respecto a las diferentes camas de propagación que se utilizaron en el experimento se encuentran en el anexo 4. Así mismo el cuadro 14, muestra los costos de producción parciales que tuvieron el proceso de propagación.

Se puede ver que la cama de propagación que constaba del riego tradicional posee el menor costo con 3304 Bs, y las camas provistas con el sistema de sub-irrigación de 10 cm y 20 cm del altura llegaron a costar 4155 Bs y 4264 Bs respectivamente, esto implicaría que la altura de 20 cm que tuvo la tercera cama de propagación incrementa su costo de producción respectivo por considerar incrementar su volumen.

**Cuadro 14.** Costos de producción por camas de propagación

Tratamiento	Costos de producción (Bs)
Riego tradicional	3304
Altura de 10 cm	4155
Altura de 20 cm	4264

Fuente: Elaboración propia

El cuadro 15 muestra los costos unitarios que alcanzaron a tener cada esqueje de álamo enraizado al finalizar el experimento. El costo unitario o costo promedio resulta de la división del costo total entre el número de unidades producidas, como indica la ecuación 7 (Samuelson y Nordhaus, 2010).

$$CU = \frac{CT}{c} \quad (7)$$

Donde:  $CU$ , Costo unitario o Costo promedio,  
 $CT$ , Costo total  
 $c$ , Producción

**Cuadro 15.** Costo de producción unitario de los esquejes de álamo

<b>Tratamiento</b>	<b>Costos unitario (Bs)</b>
<b>Riego tradicional</b>	158,9
<b>Altura de 10 cm</b>	41,4
<b>Altura de 20 cm</b>	47,2

Fuente: Elaboración propia

Se puede ver que los esquejes propagados en la cama con riego tradicional obtuvieron el más elevado costo Bs 158,9 por esqueje debido a su bajo porcentaje de prendimiento del 7,7 %, mientras tanto los esquejes propagados en las camas que contaban en el sistema de riego capilar, llegaron a costar Bs 41,4 y Bs 47,2 Bs por esqueje. Siendo los esquejes de la cama de propagación con el tanque de sub-irrigación de 10 cm de alto los que lograron tener menor costo por esqueje.

## 5. CONCLUSIONES

Después de realizar el análisis correspondiente a los resultados obtenidos en la propagación de esquejes de álamo, se llega a las siguientes conclusiones.

Las diferentes formas de obtener los extractos de sauce no presentan diferencias sobre el prendimiento de los esquejes de álamo. Sin embargo el diseño cámaras de sub-irrigación con alturas de 10 cm y 20 cm logran repercutir sobre el enraizamiento de los esquejes de álamo.

Se logra un mejor arraigamiento de los esquejes de álamo con extractos de sauce que no sufren un tratamiento térmico previo.

El riego capilar logra expresar tasas de crecimiento de 2 mm/semana en esquejes de álamo, frente al riego tradicional que logra una tasa de 0,03 mm/semana.

El agua de riego aplicado en camas que cuentan con sistema de riego capilar demora en evaporarse, por tanto los cultivos puestos en estas camas siempre contarán con una buena humedad para su desarrollo, salvo que se llegue a sobresaturar el sustrato.

La altura del tanque de almacenamiento de agua en las cámaras de propagación con riego capilar puede ser diseñada de menor tamaño, 10 cm de altura; solo debe considerarse el volumen de agua que vaya a introducirse en dicho tanque.

Los costos unitarios de producción de los plantines de álamo obtenidos en las camas con riego capilar son Bs 41,4 y 47,2, siendo estos menores respecto a los costos del riego tradicional que es Bs 158,9. Sin embargo estos costos son elevados frente al precio comercial ofertados en Bs 5 a plantines de álamo de 25 cm de altura y Bs 8 a plantines que cuentan con 45 cm de altura.

La forma de riego suministrada a los esquejes de álamo llega a repercutir en los costos de producción. Debido a que los plantines tratados con el sistema de irrigación capilar poseen tasas de crecimiento promedio de 2 mm/semana mayores frente al conseguido por el riego tradicional 0,03 mm/semana, esto significa un incremento en los beneficios al lograr obtener plantines de mayor tamaño.

## **6. RECOMENDACIONES**

Se recomienda realizar una calibración más rigurosa en el sensor de humedad de suelo YI – 69 considerando los parámetros de capacidad de campo y punto de marchitez permanente en distintos sustratos y la conductividad eléctrica del suelo, porque esta propiedad del suelo se ve afectada por la concentración de las sales presentes en él y están directamente relacionados con la evaporación del agua del suelo.

Se sugiere realizar un análisis de aptitud de agua de riego y oxígeno disuelto en el agua aplicada a las camas de sub-irrigación con sistema circulación y sin ella para verificar si el agua sufre alteraciones en los parámetros de calidad de agua de riego.

Para observar tiempos enraizamiento en esquejes de árboles forestales se recomienda trabajar con distintas concentraciones de extracto de sauce molido, o en aplicaciones diluidas con el sistema de nebulización.

En caso de que exista una saturación en las camas de propagación se recomienda considerar incrementar un sistema de drenaje para eliminar el agua excedente en el sistema de sub-irrigación, para evitar la asfixia de las raíces de los cultivos.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

**Agroproyectos. 2013.** Qué es la Relación Beneficio Costo (R B/C). México. (En línea) Consultado el 5 de nov. Del 2017. Disponible en <http://www.agroproyectos.org/relacion-beneficio-costo/#comments>

**Amico, I. s.f.** Viverización y cultivo de álamos y sauces en el NO del Chubut. INTA. E.E.A. Esquel. Argentina.

**Andreau, R., Giménez, D., Beltrano, J. 2015.** Cultivo en hidroponía. 1<sup>ra</sup> Edición. La Plata: Universidad Nacional de La Plata. Buenos Aires. Argentina.

**Azcón-Bieto, J., Talón, M. 2008.** Fundamentos de fisiología vegetal. 2<sup>da</sup> Edición. Editorial Mc Graw-Hill Interamericana. Madrid.

**Ball, J., Carle, J., Del Lungo, A. 2005.** Contribución de álamos y sauces a la silvicultura. Unasyuva 221. Volumen 56. (En línea). Consultado el 30 de sep. 2017. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/008/a0026s/a0026s02.htm>

**Bittelli, M. 2011.** Measuring soil wáter content: A review. HortTechnology. June. (En línea). Consultado el 19 de nov. 2017. Disponible en <http://horttech.ashspublications.org/content/21/3/293.full.pdf+html>

**Calcina, M. 2015.** Evaluación de dosis de caldo de humus de lombriz en dos sistemas hidropónicos para la producción de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en ambiente protegido. Tesis de grado para optar el cargo en licenciado de ingeniería agronómica. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de agronomía. 78 p.

**Cañaviri, E. 2007.** Reproducción mediante estacas de tres especies de álamo (*Populus spp.*) con tres tipos de fitohormonas en Araca – provincia Loayza. Tesis de grado para optar el cargo en licenciado de ingeniería agronómica. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de agronomía. 86 p.

**Centellas, A., Álvarez, V., Acuña, E., Rocha, E., Maita, E. 2011.** Manual de propagación de plantines de duraznero y manzano bajo invernadero. PROINPA. Cochabamba.

**Cerrillo, T., Álvarez, J., Álvarez, J., Battistella, A., Braccini, C., Casaubón, E., Ceballos, D., Cortizo, S., Fernández, E., Fernández, P., Faustino, L., Fracassi, N.,**

**García, M., González, A., Grieco, L., Hemming, A., Landi, L., Mangieri, V., Mema, V., Monteverde, S., Mujica, G., Olemberg, D. 2015.** La forestación de salicáceas como aporte al desarrollo sustentable del Delta del Paraná. XXIX Jornadas forestales de Entre Ríos. Concordia. Argentina.

**COFSF (Centro Operativo Forestal Santa Fe). 2016.** Mejoramiento genético y silvicultural de sauces y álamos. Boletín forestal. Año N° 7. Boletín N° 24. Santa Fe.

**Collazo, M., Montaña, J. 2012.** Manual de agua subterránea. 1<sup>ra</sup> Edición. Proyecto Producción responsable. Montevideo. Uruguay.

**Colombo, A. 2006.** La reproducción por esquejes. Editorial De Vecchi. Barcelona.

**Cruz, M., Melgarejo, L., Romero, M. 2010.** Experimentos en fisiología vegetal. Universidad Nacional de Colombia. Colombia.

**Di Marco, E. 2015.** *Populus sp* (Álamo, chopo) familia *Salicaceas*. Producción forestal. Año N° 5. Revista N° 13. Julio 2015. Argentina. (En línea). Consultado el 30 de sep. 2017. Disponible en <http://forestindustria.magyp.gob.ar/archivos/revista-produccion-forestal/13.pdf>

**Draier, E., Huarte, J., Lebendiker, A., Méndez, A., Pértega, G., Rivas, M., Romero, J., Sicardi, J., Spina, M., Vicchi, A. 2013.** Claves para emprendedores: conceptos básicos para planificar y desarrollar tu proyecto. 1<sup>ra</sup> Edición. Ministerio de Desarrollo Económico del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires. Buenos Aires. Argentina.

**Dumroese, RK. Pinto, JK., Jacobs, DF. Davis, AS., Horiuchi, B. 2006.** Subirrigation reduces wáter use, nitrogen loss, and moss growth in a container nursery. *Native Plants Journal* 7.

**Dumroese, RK., Davis, AS., Jacobs, DF. 2011.** Nursery response of *Acacia koa* seedlings to container size, irrigation method, and fertilization rate. *Journal of Plant Nutrition* 34.

**Elecfreaks devote to open hardware, 2015.** Octopus soil Moisture sensor brick. (En línea) Consultado el 29 de sep. 2017. Disponible en [http://www.elecfreaks.com/wiki/index.php?title=Octopus\\_Soil\\_Moisture\\_Sensor\\_Brick](http://www.elecfreaks.com/wiki/index.php?title=Octopus_Soil_Moisture_Sensor_Brick)

**García, A. 2014.** Módulo HL – 69: Un sensor de humedad de suelo. (En línea). Panamá. Consultado el 29 de sep. 2017. Disponible en <http://panamahitek.com/modulo-hl-69-un-sensor-de-humedad-de-suelo/>

**Gutiérrez, M. 2013.** Evaluación del efecto de dos enraizadores naturales en la propagación asexual de esquejes de ligustro verde (*Ligustrum lucidum*) para la producción de plantines en Cota Cota. Tesis de grado para optar el cargo en licenciado de ingeniería agronómica. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de agronomía. 93 p.

**Ipizia, 2011.** Consideraciones generales para la propagación de especies forestales, Perú.

**Landis, TD. 1998.** Management of forest nursery soils dominated by calcium salts. New Forests 2.

**Lima, E., De Souza, G., Dos Santos, A., Dos Santos, J. 2010.** Manual de fisiología vegetal. Editorial EDUFMA. Sao Luis.

**Lucana, M. 2014.** Producción de plantines de álamo (*Populus balsamífera* L.) a partir de estacas en distintos sustratos en un ambiente controlado, en la comunidad de Huancané – Departamento de La Paz. Tesis de grado para optar el cargo en licenciado de ingeniería agronómica. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de agronomía. 77 p.

**Malky, A. 2005.** Diagnósticos sectoriales. Sector forestal en Bolivia. Unidad de análisis de políticas sociales y económicas. Bolivia.

**Martínez, F. 2005.** Multiplicación de ornamentales por esquejes de tallo. Compendio de horticultura. Planteles. (En línea) consultado el 01 de Oct. 2017. Disponible en <http://www.horticom.com/pd/imagenes/62/897/62897.pdf>

**Medina, Y. 2016.** Evaluación de sustancias endógenas promotoras del enraizamiento presentes en *Salix Chilensis* Molina mediante bioensayos en *Vigna radiata* (L.) R. Wilczek y *Rubus ulmifolius* Schott. Tesis de grado para optar el título profesional de biólogo. Arequipa – Perú. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Facultad de Ciencias Biológicas. 63 p.

- Mindreau, M., Zúñiga, C. 2010.** Manual de forestaría comunitaria de alta montaña.
- Miranda, L. 2016.** Propagación asexual del eucalipto (*Eucalyptus viminalis*) con enraizador natural (agua de coco), en la cámara de sub-irrigación en el centro experimental de Cota Cota. Tesis de grado para optar el cargo en licenciado de ingeniería agronómica. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de agronomía. 92 p.
- Mohan, K. 2016.** Propagating shrubs, vines, and trees from stem cuttings. Department of Horticulture, Washington State University.
- Monk, S. 2012.** 30 proyectos con arduino. Traducido por Pompa, J. 1<sup>ra</sup> Edición. Editorial Estribor. Madrid. España
- Morgan, N. 2013.** Improve rooting in cuttings by choosing the best material and providing the right conditions. The Garden. Abril. (En línea). Consultado el 5 de nov. 2017. Disponible en <https://www.rhs.org.uk/about-the-rhs/publications/magazines/the-garden/2013-issues/april/Successful-cuttings.pdf>
- Müller, H. 2012.** Ascenso capilar de agua en el suelo, pieza clave en la buena germinación de semillas. Revista Cooprinforma. Edición 114. Noviembre/Diciembre 2012. Chile. (En línea). Consultado el 29 de sep. 2017. Disponible en <http://cooprinsem.cl/home/pdf/cooprinforma/cooprinforma114.pdf>
- Müller, R., Pacheco, P., Montero, J. 2014.** El contexto de la deforestación y degradación de los bosques en Bolivia: Causas, actores e instituciones. Documentos ocasionales 100. Bogor, Indonesia: CIFOR.
- Myrobotself. 2016.** Sensor de humedad del suelo: Módulos YI – 69 e YI – 38. (En línea). Consultado el 22 de nov. 2017. Disponible en <https://myrobotself.com/2016/07/23/sensor-de-humedad-del-suelo-modulos-yi-69-y-yi-38/>
- Noreña, L. Cortés, D. 2015.** Caracterización y calibración de un sensor de humedad de bajo costo para optimizar su desempeño dentro de una red WSN en escenarios indoor. Actas de Ingeniería. Vol.1. Colombia.
- Organización Industrial del Sector Madera y Mueble (OISM y M). 2010.** El cultivo y utilización del chopo en España. España.

**Ortiz, C. 2014.** Evaluación de la eficacia de tres enraizadores orgánicos y Ácido Indol Acético (AIA) en esquejes de aguaymanto (*Physalis peruviana Linnaeus*) en Lircay – Angaraes. Tesis de investigación para optar el título profesional de ingeniero agrónomo. Huancavelica – Perú. Universidad Nacional de Huancavelica. Facultad de Ciencias Agrarias.

**Plan de Desarrollo Municipal de Patacamaya, 2012.** Estrategia municipal consolidado ajuste plan de desarrollo municipal. Patacamaya 2012 – 2016.

**Plaster, E. 2000.** La ciencia del suelo y su manejo. Traducido por Patricia Scott. Editorial Thomson Paraninfo S. A. España.

**ProMéxico, 2010.** Como determinar el precio de exportación. Secretaría de Economía. México.

**Quinteros, I. 2014.** Enraizamiento de dos especies de queñua (*Polylepis tarapacana* y *Polylepis besseri* Hieron.) en cuatro sustratos, bajo ambiente protegido. Tesis de grado para optar el cargo en licenciado de ingeniería agronómica. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de agronomía. 91 p.

**Quiroga, A., Bono, A. 2012.** Manual de fertilidad y evaluación de suelos. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina.

**Quispe, M. 2013.** Propagación vegetativa de esquejes de queñua (*Polylepis besseri* Hieron) en base a la aplicación de dos enraizadores naturales y tres tipos de sustratos en el vivero de la comunidad de Huancané. Tesis de grado para optar el cargo en licenciado de ingeniería agronómica. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de agronomía. 117 p.

**Ramírez, N., Luna-Gómez, A., Castañeda, H., Martínez, M., Holz, S., Camacho, A., González-Espinoza, M. 2012.** Guía de propagación de árboles nativos para la recuperación de bosques. 2<sup>da</sup> Edición. Chiapas. México.

**Reyes, J. 2015.** Guía de técnicas, métodos y procedimientos de reproducción asexual o vegetativa de las plantas. Clúster de Viveristas Dominicano, CLUSVIDON. Santo Domingo. República Dominicana.

**Roche, H. 2013.** Metodologías generales y sectoriales: Metodología general de formulación y evaluación económica de proyectos de inversión pública. Facultad de Ciencias Económicas y de Administración. Universidad de la República. Uruguay.

**Saldías, M. 2011.** Jardinería en Chile. 1ra Edición. Editorial Universidad Central. Chile.

**Samuelson, P., Nordhaus, W. 2010.** Economía con aplicación a Latinoamérica. 19<sup>na</sup> Edición. McGraw-Hill interamericana. México.

**Schmal, J., Dumroese, R., Davis, A., Pinto, J., Jacobs, D. 2011.** Subirrigation for production of native plants in nurseries – concepts, current knowledge, and implementation. Native Plants 12.

**Sisaro, D., Hagiwara, J. 2016.** Propagación vegetativa por medio de estacas de tallo. 1ra Edición. Ediciones INTA. Buenos Aires. Argentina.

**Tinco, E. 2013.** Evaluación de tres tipos de esquejes de verónica (*Hebe x andersonii*) bajo el efecto de dos enraizadores naturales para la producción de plantines en Cota Cota. Tesis de grado para optar el cargo en licenciado de ingeniería agronómica. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de agronomía. 75 p.

**Torrente, O. 2013.** Arduino curso práctico de formación. 1ra Edición. Editorial Alfaomega. México.

**Ueguchi-Tanaka, M., Nakajima, M., Motoyuki, A., Matsuoka, M. 2007.** Gibberellin receptor and its role in gibberellin signaling in plants. *Annual Review of Plant Biology*.

**Villarpando, D., Villarpando, P., Villalobos, J. 2011.** Fichas botánicas de especies agroforestales nativas aptas para tierras Altoandinas. Proyecto de adaptación al impacto del retroceso acelerado de los glaciares en los Andes tropicales. Bolivia.

**Vásquez, A. 2001.** Silvicultura de plantaciones forestales en Colombia. Facultad de Ingeniería forestal. Universidad Del Tolima. Ibagué – Tolima.

# ANEXOS

## Anexo 1. Registro de datos de campo

### Resultados finales del porcentaje de prendimiento

Tratamiento	Tipo de riego	Extracto	Repetición	Porcentaje de prendimiento (%)
T1R1	Tradicional	Infusión	1	11,1
T1R2	Tradicional	Infusión	2	6,7
T1R3	Tradicional	Infusión	3	9,5
T2R1	Tradicional	Molido	1	7,1
T2R2	Tradicional	Molido	2	2,2
T2R3	Tradicional	Molido	3	9,5
T3R1	10cm	Infusión	1	18,8
T3R2	10cm	Infusión	2	47,6
T3R3	10cm	Infusión	3	42,9
T4R1	10cm	Molido	1	45,2
T4R2	10cm	Molido	2	43,8
T4R3	10cm	Molido	3	25,0
T5R1	20cm	Infusión	1	37,8
T5R2	20cm	Infusión	2	21,4
T5R3	20cm	Infusión	3	46,7
T6R1	20cm	Molido	1	28,6
T6R2	20cm	Molido	2	20,0
T6R3	20cm	Molido	3	26,2

Fuente: Elaboración propia

### Resultados finales de la altura de planta

Tratamiento	Tipo de riego	Extracto	Repetición	Altura de Planta (cm)
T1R1	Tradicional	Infusión	1	7,8
T1R2	Tradicional	Infusión	2	7,9
T1R3	Tradicional	Infusión	3	8,0
T2R1	Tradicional	Molido	1	8,5
T2R2	Tradicional	Molido	2	7,9
T2R3	Tradicional	Molido	3	8,1
T3R1	10cm	Infusión	1	10,5
T3R2	10cm	Infusión	2	9,8
T3R3	10cm	Infusión	3	8,8
T4R1	10cm	Molido	1	9,9
T4R2	10cm	Molido	2	11,4
T4R3	10cm	Molido	3	10,4
T5R1	20cm	Infusión	1	11,3
T5R2	20cm	Infusión	2	10,9
T5R3	20cm	Infusión	3	10,8
T6R1	20cm	Molido	1	10,8
T6R2	20cm	Molido	2	10,3
T6R3	20cm	Molido	3	10,9

Fuente: Elaboración propia

## Seguimiento del crecimiento de los esquejes de álamo

Crecimiento semanal de los esquejes de álamo (cm)														
Fecha	27-ene	03-feb	10-feb	17-feb	24-feb	03-mar	10-mar	17-mar	24-mar	31-mar	07-abr	14-abr	21-abr	28-abr
<b>T1 (Tradicional * Infusión)</b>	7,5	7,5	7,5	7,6	7,6	7,6	7,7	7,7	7,7	7,7	7,8	7,8	7,9	7,9
<b>T2 (Tradicional * Molido)</b>	7,5	7,5	7,5	7,6	7,6	7,6	7,7	7,8	7,8	7,9	7,9	8,0	8,0	8,1
<b>T3 (10 cm * Infusión)</b>	7,5	7,5	7,6	7,7	7,8	8,0	8,1	8,4	8,6	9,0	9,3	9,6	9,8	9,8
<b>T4 (10 cm * Molido)</b>	7,5	7,6	7,7	7,9	8,1	8,4	8,7	9,0	9,3	9,6	9,9	10,2	10,4	10,6
<b>T5 (20 cm * Infusión)</b>	7,5	7,6	7,7	7,8	8,1	8,3	8,6	8,9	9,2	9,5	9,8	10,2	10,6	11,0
<b>T6 (20 cm * Molido)</b>	7,5	7,6	7,7	7,8	8,0	8,2	8,5	8,8	9,0	9,4	9,7	10,0	10,3	10,7

Fuente: Elaboración propia

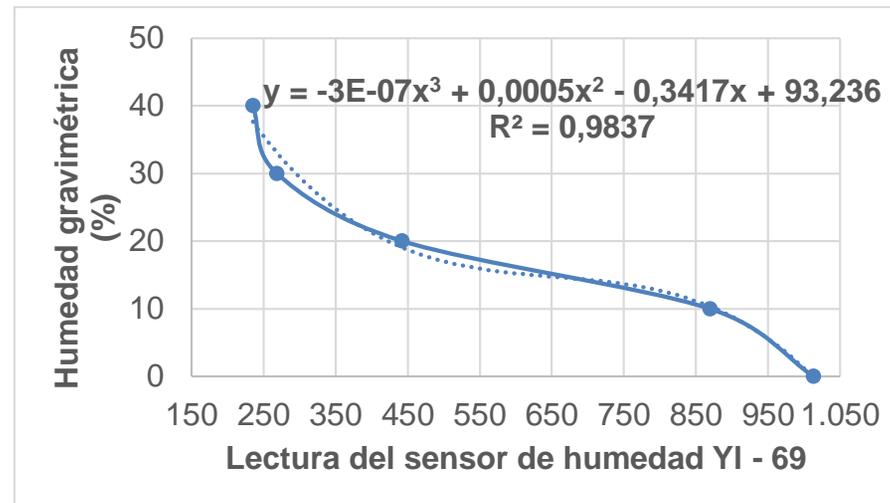
## Anexo 2. Registro de datos de humedad del suelo y transformación a humedad gravimétrica

### Lecturas del sensor de humedad YI – 69

Fecha	27-ene	03-feb	10-feb	17-feb	24-feb	03-mar	10-mar	17-mar	24-mar	31-mar	07-abr	14-abr	21-abr	28-abr
<b>Tradicional</b>	431,8	464,2	475,5	488,3	460,5	578,8	446,3	562,0	501,0	603,2	483,0	462,3	488,3	409,3
<b>10 cm</b>	267,2	288,5	299,0	299,5	287,7	281,2	268,8	256,0	280,3	365,7	289,0	280,8	240,7	257,3
<b>20 cm</b>	271,0	281,7	297,3	303,7	262,7	320,2	310,3	308,5	269,5	358,5	306,3	267,8	280,0	263,3

Fuente: Elaboración propia

Curva de regresión y ecuación de tercer grado de mejor ajuste para la calibración del sensor de humedad YI - 69



Fuente: Elaboración propia

Valores de la lectura del sensor YI – 69 transformado a humedades gravimétricas (%)

Fecha	27-ene	03-feb	10-feb	17-feb	24-feb	03-mar	10-mar	17-mar	24-mar	31-mar	07-abr	14-abr	21-abr	28-abr
<b>Tradicional</b>	14,8	12,4	11,6	10,7	12,6	4,8	13,7	5,9	9,8	3,2	11,0	12,5	10,7	16,6
<b>10 cm</b>	31,9	29,1	27,7	27,7	29,2	30,0	31,7	33,5	30,1	20,5	29,0	30,1	35,8	33,3
<b>20 cm</b>	31,4	30,0	28,0	27,2	32,5	25,2	26,4	26,6	31,6	21,2	26,9	31,8	30,2	32,4

Fuente: Elaboración propia

**Anexo 2.** Registro de las temperaturas media, máxima, mínima y humedad relativa

<b>Fecha</b>	<b>27-ene</b>	<b>03-feb</b>	<b>10-feb</b>	<b>17-feb</b>	<b>24-feb</b>	<b>03-mar</b>	<b>10-mar</b>	<b>17-mar</b>	<b>24-mar</b>	<b>31-mar</b>	<b>07-abr</b>	<b>14-abr</b>	<b>21-abr</b>	<b>28-abr</b>
<b>Temperatura media (°C)</b>	23,5	22	26,4	31	19,2	26,8	27,6	22	24,1	16,5	28,6	30,5	28,5	16,8
<b>Temperatura máxima (°C)</b>	35	37	38,1	43	29,5	30,5	25,7	37	36,6	29,9	36,4	39,6	37,7	42
<b>Temperatura mínima (°C)</b>	11	12,4	6,4	13	9,2	10	9,8	11	10,6	10,2	5,5	5,5	5,8	2,8
<b>Humedad relativa (%)</b>	40	40	33	38	49	37	42	39	36	54	28	25	38	63

Fuente: Elaboración propia con base a las lecturas tomadas por el termómetro e higrómetro del Centro Experimental de Patacamaya

### Anexo 3. Costo de producción

#### Costo de producción de la cama con riego tradicional

N°	Ítem	Unidad	Cantidad	Precio unitario (Bs)	Total (Bs)
<b>1</b>	<b>MATERIA PRIMA</b>				
1	Álamo	Esqueje	270	2	540
<b>Costo parcial (Bs)</b>					<b>540</b>
<b>2</b>	<b>INSUMOS</b>				
1	Turba	m <sup>3</sup>	0,42	240	100,8
2	Arena	m <sup>3</sup>	0,42	200	84
3	Formol	l	0,16	30	4,8
4	Hojas de sauce	kg	0,33	5	1,65
<b>Costo parcial (Bs)</b>					<b>191,25</b>
<b>3</b>	<b>CONSTRUCCIONES Y EQUIPOS</b>				
<b>Cama de propagación y cámara de irrigación</b>					
1	Ladrillo	Pieza	39	0,7	27,3
2	Cemento	Bolsa	0,7	56	39,2
<b>Costo (Bs)</b>					<b>66,5</b>
<b>Sistema de nebulización</b>					
<b>Costo (Bs)</b>					<b>898,7</b>
<b>Sistema de agua potable</b>					
<b>Costo (Bs)</b>					<b>21,3</b>
<b>Material en general</b>					
<b>Costo (Bs)</b>					<b>1004,8</b>
<b>Costo parcial (Bs)</b>					<b>1991,4</b>
<b>4</b>	<b>MANO DE OBRA</b>				
1	Riego	h	12,87	15	193,05
2	Remoción del sustrato	h	2	15	30
3	Nebulización	h	3,61	15	54,15
<b>Costo parcial (Bs)</b>					<b>570,5</b>
<b>5</b>	<b>COSTOS FIJOS</b>				
<b>Costo parcial (Bs)</b>					<b>10,7</b>
<b>COSTO TOTAL (Bs)</b>					<b>3303,8</b>

Fuente: Elaboración propia

Costo de producción de la cama con altura de tanque de 10 cm

N°	Ítem	Unidad	Cantidad	Precio unitario (Bs)	Total (Bs)
<b>1</b>	<b>MATERIA PRIMA</b>				
1	Álamo	Esqueje	270	2	540
<b>Costo parcial (Bs)</b>					540
<b>2</b>	<b>INSUMOS</b>				
1	Turba	m3	0,42	240	100,8
2	Arena	m3	0,42	200	84
3	Piedra		0,27	150	40,5
4	Formol	litro	0,16	30	4,8
5	Agrofil	m	12,5	25	312,5
6	Hojas de sauce	kg	0,33	5	1,65
<b>Costo parcial (Bs)</b>					544,25
<b>3</b>	<b>CONSTRUCCIONES Y EQUIPOS</b>				
<b>Cama de propagación y cámara de irrigación</b>					
1	Ladrillo	Pieza	39	0,7	27,3
2	Cemento	Bolsa	0,7	56	39,2
3	Agrofil	m	12,5	25	312,5
5	Tubería de 3/4"	m	1,5	6	9
6	Codo 3/4"	Pieza	1	4,5	4,5
<b>Costo (Bs)</b>					392,5
<b>Sistema de circulación</b>					
1	Conector para tanque 1/2"	Pieza	1	15	15
2	Copla 1/2"	Pieza	1	2	2
3	Niple 1/2"	Pieza	1	2	2
4	Codo 1/2"	Pieza	2	2,5	5
5	Interruptores	Pieza	1	4,5	4,5
6	Enchufes	Pieza	1	2	2
7	Manguera 1"	m	0,5	9	4,5
8	Manguera de 3/4"	m	0,75	7	5,25
9	Abrazadera 30 - 32	Pieza	3	4	12
10	Bomba de agua (0,48 Watt)	Pieza	1	55	55
11	Reductor 3/4" a 1/2"	Pieza	1	4	4
12	Cable N° 12	m	0,75	8	6
13	Pernos	Juego	1	3	3
14	Tubería de 1/2"	m	0,4	5	2
15	Listones de Madera	Juego	1	10	10
<b>Costo (Bs)</b>					122,25

<b>Medidor de nivel de agua</b>					
1	Conector para tanque 1/2"	Pieza	1	15	15
2	Abrazadera 30 - 32	Pieza	1	4	4
3	Copla 1/2"	Pieza	1	2	2
4	Niple 1/2"	Pieza	1	2	2
5	Manguera transparente 1/2"	m	0,2	3	0,6
<b>Costo (Bs)</b>					<b>23,6</b>
<b>Sistema de nebulización</b>					
<b>Costo (Bs)</b>					<b>898,7</b>
<b>Sistema de agua potable</b>					
<b>Costo (Bs)</b>					<b>21,3</b>
<b>Material en general</b>					
<b>Costo (Bs)</b>					<b>1004,8</b>
<b>Costo parcial (Bs)</b>					<b>2463,2</b>
<b>4</b>	<b>MANO DE OBRA</b>				
1	Riego	h	1,62	15	24,3
2	Circulación de agua	h	13	15	195
3	Remoción del sustrato	h	2	15	30
4	Nebulización	h	3,61	15	54,15
<b>Costo parcial (Bs)</b>					<b>596,8</b>
<b>5</b>	<b>COSTOS FIJOS</b>				
<b>Costo parcial (Bs)</b>					<b>10,7</b>
<b>COSTO TOTAL (Bs)</b>					<b>4154,9</b>

Fuente: Elaboración propia

Costo de producción de la cama con altura de tanque de 20 cm

N°	Ítem	Unidad	Cantidad	Precio unitario (Bs)	Total (Bs)
<b>1</b>	<b>MATERIA PRIMA</b>				
1	Álamo	Esqueje	300	2	600
<b>Costo parcial (Bs)</b>					600
<b>2</b>	<b>INSUMOS</b>				
1	Turba	m3	0,42	240	100,8
2	Arena	m3	0,42	200	84
3	Piedra		0,6	150	90
4	Formol	litro	0,16	30	4,8
5	Agrofil	m	12,5	25	312,5
6	Hojas de sauce	kg	0,33	5	1,65
<b>Costo parcial (Bs)</b>					593,75
<b>3</b>	<b>CONSTRUCCIONES Y EQUIPOS</b>				
<b>Cama de propagación y cámara de irrigación</b>					
1	Ladrillo	Pieza	39	0,7	27,3
2	Cemento	Bolsa	0,7	56	39,2
3	Agrofil	m	12,5	25	312,5
5	Tubería de 3/4" 6m	m	1,5	6	9
6	Codo 3/4"	Pieza	1	4,5	4,5
<b>Costo (Bs)</b>					392,5
<b>Sistema de circulación</b>					
1	Conector para tanque 1/2"	Pieza	1	15	15
2	Copla 1/2"	Pieza	1	2	2
3	Niple 1/2"	Pieza	1	2	2
4	Codo 1/2"	Pieza	2	2,5	5
5	Interruptores	Pieza	1	4,5	4,5
6	Enchufes	Pieza	1	2	2
7	Manguera 1"	m	0,5	9	4,5
8	Manguera de 3/4"	m	0,75	7	5,25
9	Abrazadera 30 - 32	Pieza	3	4	12
10	Bomba de agua (0,48 Watt)	Pieza	1	55	55
11	Reductor 3/4" a 1/2"	Pieza	1	4	4
12	Cable N° 12	m	0,75	8	6
13	Pernos	Juego	1	3	3
14	Tubería de 1/2"	m	0,4	5	2
15	Listones de Madera	Juego	1	10	10
<b>Costo (Bs)</b>					122,25

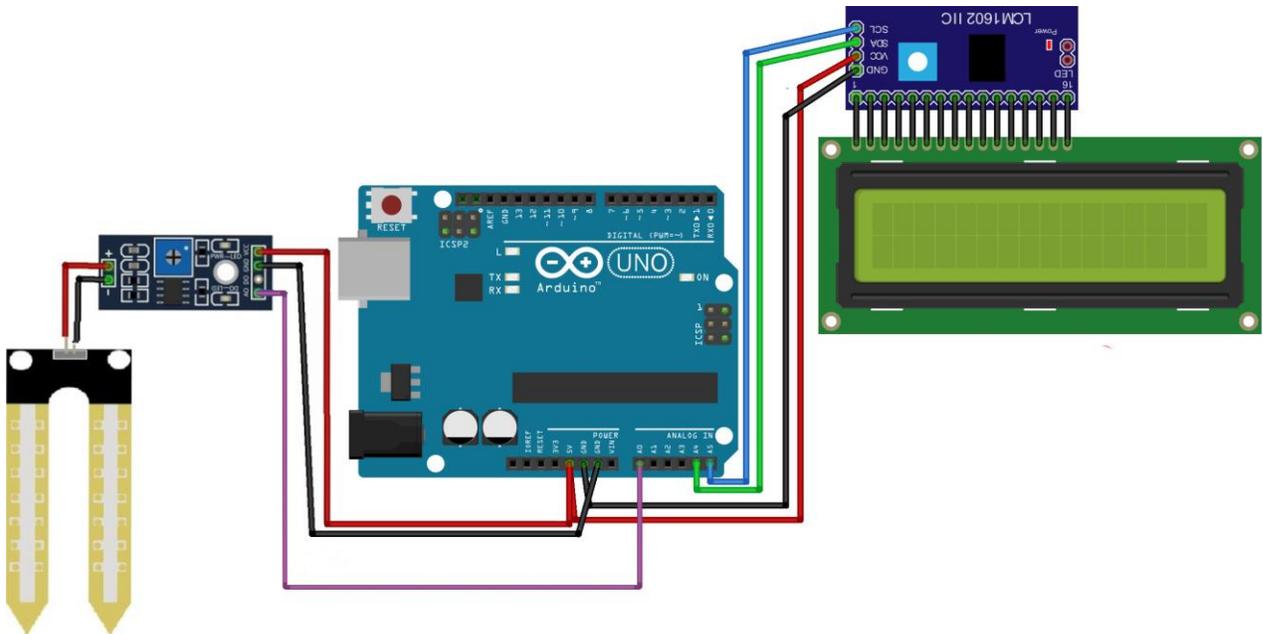
<b>Medidor de nivel de agua</b>					
1	Conector para tanque 1/2"	Pieza	1	15	15
2	Abrazadera 30 - 32	Pieza	1	4	4
3	Copla 1/2"	Pieza	1	2	2
4	Niple 1/2"	Pieza	1	2	2
5	Manguera transparente 1/2"	m	0,2	3	0,6
<b>Costo (Bs)</b>					23,6
<b>Sistema de nebulización</b>					
<b>Costo (Bs)</b>					898,7
<b>Sistema de agua potable</b>					
<b>Costo (Bs)</b>					21,3
<b>Material en general</b>					
<b>Costo (Bs)</b>					1004,8
<b>Costo parcial (Bs)</b>					<b>2463,2</b>
<b>4</b>	<b>MANO DE OBRA</b>				
1	Riego	h	1,62	15	24,3
2	Circulación de agua	h	13	15	195
3	Remoción del sustrato	h	2	15	30
4	Nebulización	h	3,61	15	54,15
<b>Costo parcial (Bs)</b>					<b>596,8</b>
<b>5</b>	<b>COSTOS FIJOS</b>				
<b>Costo parcial (Bs)</b>					<b>10,7</b>
<b>COSTO TOTAL (Bs)</b>					<b>4264,4</b>

Fuente: Elaboración propia

#### Anexo 4. Sketch de programación del sensor de humedad de suelo (YI – 69) para Arduino y esquema de ensamblaje

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);
void setup()
{
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Humedad de Suelo");
  lcd.setCursor(0,1);
}
void loop()
{
  lcd.print(analogRead(A0));
  delay(1000);
  lcd.clear();
}
```

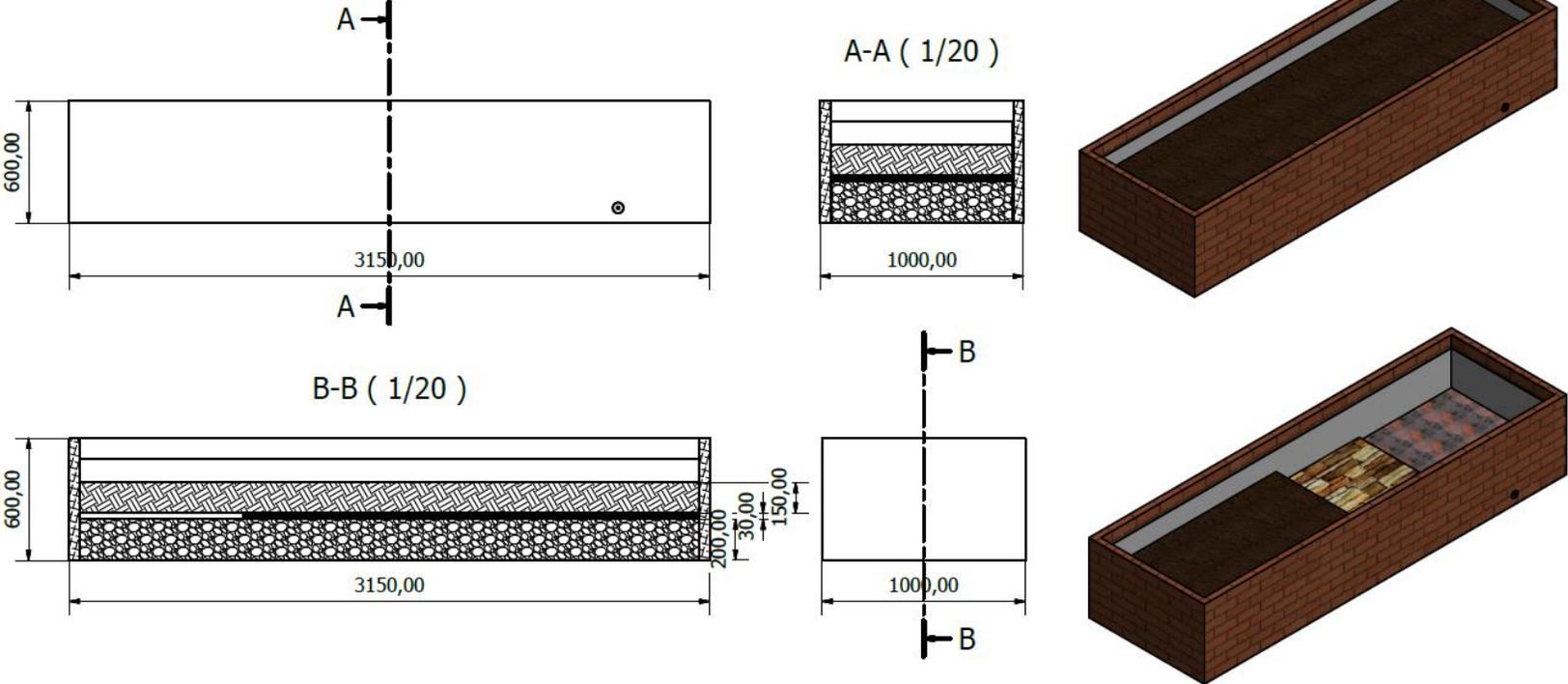
Fuente: García, Antony. [www.panamahitek.com](http://www.panamahitek.com)



fritzing

Fuente: García, Antony. [www.panamahitek.com](http://www.panamahitek.com)

**Anexo 5.** Esquema de construcción de la cama de propagación



Fuente: Elaboración propia

## Anexo 6. Actividades desarrolladas en todo el trabajo de investigación



Recepción del predio de trabajo



Predio de trabajo refaccionado



Inicio de construcción de las camas de propagación



Cámaras de sub-irrigación concluidas



Impermeabilización de las cámaras de sub-irrigación y posicionamiento del tubo de alimentación de agua



Colocación del primer estrato, piedra



Último estrato, sustrato de turba y arena (1:1)



Desinfección del sustrato con formol



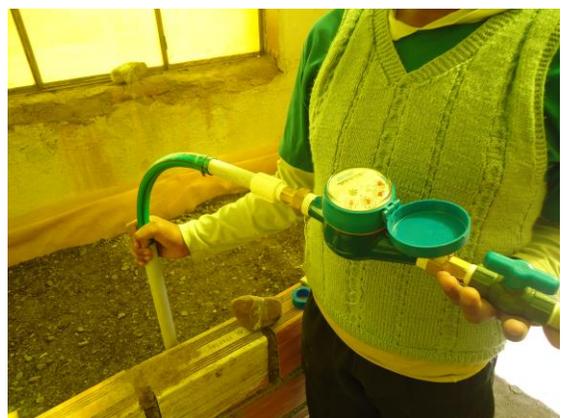
Sustrato cubierto con nylon por la desinfección



Recolección de los esquejes de álamo de los ejemplares de álamo de la estación de Patacamaya



Esquejes de álamo ya cortados y sumergidos parcialmente en los extractos de sauce



Llenado de las cámaras de sub-irrigación con agua



Plantación de los esquejes en las camas de propagación



Término de la plantación en las tres camas



Instalación de sistema de circulación de agua



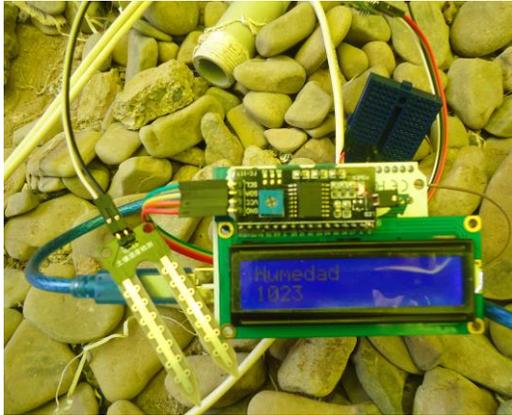
Acción del agua circulando de nuevo a la cámara de almacenamiento de agua



Instalación del sistema de nebulización



Nebulizadores instalados sobre las camas de propagación



Sensor de humedad YI – 69 ensamblado a un Arduino UNO



Medición de la humedad del suelo con el sensor YI – 69



Desarrollo de los esquejes de álamo



Toma de datos en el repique



Proceso de repicado a bolsas al culminar el experimento