

COMPORTAMIENTO DE DOS ECOTIPOS DE TARWI (*Lupinus mutabilis* Sweet.) BAJO RIEGO DEFICITARIO CONTROLADO Y TEMPERATURAS BAJAS EXTREMAS EN LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL CHOQUENAIRA

Behavior of two ecotypes of tarwi (*Lupinus mutabilis* sweet.) under controlled deficit irrigation and extreme low temperatures at the Choquenaira Experimental Station

María Elena Huanca Ticona¹; René Chipana Rivera²; Fabiola Figueredo Fernandez³; Gladys J. Chipana Mendoza²

RESUMEN

En La Paz, el cultivo de tarwi ha tomado importancia en los últimos años, debido a su contribución en el desarrollo de políticas agroalimentarias y seguridad alimentaria, asimismo, no se tienen muchos trabajos de investigación sobre riego deficitario controlado en el Altiplano boliviano. Es debida a esta carencia de información que el objetivo de la presente investigación es evaluar el comportamiento agronómico de dos ecotipos de tarwi bajo riego deficitario controlado y temperaturas bajas extremas. El trabajo se desarrolló en la Estación Experimental Choquenaira, la metodología consistió en la evaluación de los ecotipos de Copacabana y Carabuco bajo tres láminas de riego al 50, 75 y 100%, que fueron dispuestos bajo un diseño de bloques completos al azar con un arreglo de parcelas divididas, las variables evaluadas fueron el porcentaje de emergencia, altura de planta, número de ramas por planta, número de vainas por planta, número de granos por vaina y diámetro del tallo, asimismo se calculó la incidencia y severidad del efecto de la helada sobre el cultivo. Entre los principales resultados se tiene que las variables número de rama, número de vaina, número de grano por vaina tuvieron diferencias significativas bajo el efecto de las láminas de riego aplicadas al 50, 75 y 100%. La prueba de Duncan en todos los casos se puede observar la formación de dos grupos, donde el grupo A, está conformada por el 50% de lámina de riego, las demás láminas forman el grupo B. La cantidad de agua aplicada fue de 1438.60, 1078.90 y 718.90 m³ ha⁻¹ para el 100, 75 y 50% de lámina de riego. El tarwi se encuentra influenciado por la escasez del agua, el estrés hídrico produce mayor retención de agua en sus tejidos, en condiciones de extrema sequedad del ambiente en el Altiplano producen estrés a los cultivos incluso cuando estos cuentan con suficiente humedad.

Palabras clave: *Lupinus mutabilis* Sweet.; incidencia, severidad, helada, riego deficitario.

ABSTRACT

In La Paz, the cultivation of tarwi has become important in recent years, due to its contribution to the development of agri-food policies and food security. Likewise, there is not much research work on controlled deficit irrigation in the Bolivian highland. It is due to this lack of information that the objective of this research is to evaluate the agronomic behavior of two ecotypes of tarwi under controlled deficit irrigation and extreme low temperatures. The work was developed in the Experimental Station Choquenaira, the methodology consisted in the evaluation of the ecotypes from Copacabana and Carabuco under three sheets of irrigation to 50, 75 and 100%, that were arranged under a design of complete blocks at random with an arrangement of divided plots, the variables evaluated were the percentage of emergence, height of plant, number of branches per plant, number of pods per plant, number of grains per pod and stem diameter, as well as the incidence and severity of the effect of the frost on the crop. Among the main results we have that the variables branch number, pod number, number of grain per pod had significant differences under the effect of irrigation sheets applied at 50, 75 and 100%. The Duncan test in all cases can be observed the formation of two groups, where the group A, is made up of 50% irrigation sheet, the other sheets form the group B. The amount of water applied was 1438.60, 1078.90 and 718.90 m³ ha⁻¹ for 100, 75 and 50% of irrigation sheet. The tarwi is influenced by the scarcity of water, water stress produces greater retention of water in their tissues, in conditions of extreme dryness of the environment in the highland produce stress to crops even when they have enough moisture.

Keywords: *Lupinus mutabilis* sweet, incidence, severity, frost, deficit irrigation.

¹ Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. mistik765@hotmail.com

² Docente Investigador, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia.

³ Consultora, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia.

INTRODUCCIÓN

En Bolivia, la mayoría de la semilla sembrada de tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet.) es del ecotipo Chumpi Tarwi (69%), de un color pardo oscuro y muy conocida en la región; el ecotipo Tarwi Ñawi (20%) de color oscuro en la parte del embrión, es poco difundido por esta característica y su tamaño pequeño; y el ecotipo Blanca (16%) de tamaño grande y color blanco, utilizada por muy pocos productores (INIAF, 2009).

La semilla de tarwi es nutritiva, posee en promedio 35.5% de proteína, 16.9% de aceites, 7.65% de fibra cruda, 4.14% de cenizas y 35.77% de carbohidratos, donde se encuentra correlación positiva entre proteína y alcaloides, y negativa entre proteína y aceite (Gross et al. 1988).

Según la FAO (2006), el cultivo de tarwi es propio de suelos pobres y marginales, se desarrolla mejor en suelos francos a francos arenosos, requiere un balance adecuado de nutrientes. Los requerimientos de humedad son variables dependiendo de los ecotipos, sin embargo, el tarwi se cultiva bajo secano, la planta es susceptible a sequías durante la formación de flores y frutos, afectando seriamente la producción (Gross, 1982).

Morlon (1992), señala que el riesgo de heladas en el Altiplano muestra cierta complejidad, las heladas son radiativas y el déficit radiativo nocturno corresponde a una disminución de la temperatura y el enfriamiento de la superficie, produciéndose la inversión térmica.

El riego deficitario es una herramienta para el manejo de los cultivos a fin de reducir el agua aplicada en los periodos fenológicos en los que el déficit hídrico controlado no afecte o el impacto sea mínimo sobre la producción y calidad de la cosecha.

En La Paz, el cultivo de tarwi ha tomado importancia en los últimos años, debido a su contribución en el desarrollo de políticas agroalimentarias y seguridad alimentaria por su aporte y gran capacidad nutricional, generación de ingresos y protección al medio ambiente. El insuficiente aprovechamiento y escaso apoyo del sector público y privado, influyen en que este producto originario esté en riesgo de desaparecer.

Asimismo, no se tienen muchos trabajos de investigación sobre riego deficitario controlado en el Altiplano boliviano. Es debida a esta carencia de

información que el objetivo de la investigación es evaluar el comportamiento agronómico de dos ecotipos de tarwi bajo riego deficitario controlado y temperaturas bajas extremas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de la zona de estudio

La Estación Experimental Choquenaira es dependiente de la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés, situada en la comunidad de Choquenaira a 8 km de la localidad de Viacha, provincia Ingavi del departamento de La Paz, ubicada a una altitud de 3870 m s.n.m., geográficamente 16° 41' 39.25" de latitud sur y 68° 17' 14.31" de longitud oeste.

Metodología

Para el análisis y la interpretación de los datos obtenidos se empleó el diseño de bloques completos al azar con un arreglo de parcelas divididas (Ecuación 1) debido a la heterogeneidad del terreno. Varios autores recomiendan este diseño al tener un factor en estudio de mayor importancia y la dificultad en el manejo de ecotipos en superficies grandes (Calzada, 1982).

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_j + \alpha_i + \varepsilon_{ij} + \gamma_k + (\alpha\gamma)_{ik} + \varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

Dónde: Y_{ijk} = observación cualquiera; μ = media de la población; β_j = efecto del j-ésimo bloque; α_i = efecto del i-ésimo ecotipo; ε_{ij} = error de parcela grande; γ_k = efecto del k-ésimo riego; $(\alpha\gamma)_{ik}$ = interacción entre el i-ésimo ecotipo y el k-ésimo riego; ε_{ijk} = error experimental.

Los factores de estudio y la combinación para sus tratamientos evaluados se muestran en la Tabla 1. El área total de la parcela fue 195.5 m².

Tabla 1. Descripción de los factores de estudio y tratamientos evaluados.

Tratamiento	Factor A (ecotipo)	Factor B (riego)
T1	Copacabana	100% de lámina de riego
T2	Copacabana	75% de lámina de riego
T3	Copacabana	50% de lámina de riego
T4	Carabuco	100% de lámina de riego
T5	Carabuco	75% de lámina de riego
T6	Carabuco	50% de lámina de riego

Para el análisis físico y químico del suelo se tomaron muestras por el método de zigzag, estos análisis fueron desarrollados por el Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología Nuclear (IBTEN). La determinación del

punto de machitez permanente (P.M.P.) y capacidad de campo (C.C.) fue a través del uso de las ollas de presión de Richards a una presión constante de 15 bares y 0.3 bares respectivamente (Chilón, 1997). La densidad aparente fue determinada por el método de los cilindros (Ecuación 2), las muestras fueron llevarlas a la mufla a 105°C por 48 h.

$$Dap = \frac{Mss}{Vc} \quad (2)$$

Dónde: Dap = densidad aparente (g cm⁻³); Mss = masa de suelo seco (g); Vc = volumen del cilindro (cm³).

La determinación de la velocidad de infiltración básica fue por el método del cilindro infiltrómetro (Ecuación 3), con dos pruebas en la parcela (Kostiakov, 1932).

$$Ii = Ki \cdot (t)^n \quad (3)$$

Dónde: Ii = velocidad de infiltración instantánea (cm h⁻¹); ki, n = coeficientes empíricos de la función de infiltración (-1 < n < 0); t = tiempo de oportunidad (min).

El cultivo anterior a la presente evaluación fue papa (*Solanum tuberosum*), por lo que se hizo el abonado con estiércol ovino a razón de 0.5 kg m⁻². La siembra fue considerando una distancia entre surcos de 0.60 m y entre plantas de 0.30 m, cada unidad experimental constó de 24 plantas. El riego fue manual localizado, con una frecuencia de cinco días, además se consideró el estado hídrico del suelo para determinar las cantidades de agua para la irrigación.

Para el cálculo de los volúmenes de agua requerida por el cultivo de tarwi, se determinó tres láminas de riego 100%, 75% y 50%, considerando la evapotranspiración de referencia (ET_o) y los aportes de agua de la precipitación efectiva (Ecuación 4), la ascensión capilar fue despreciable y las pérdidas por percolación profunda fueron iguales a cero, debido a que la napa freática está a profundidades mayores de 0.50 m de la superficie del suelo.

$$Pe = \alpha \cdot PT \quad (4)$$

Dónde: Pe = precipitación efectiva (mm); α = fracción fija (0 a 1) establecida arbitrariamente; PT = precipitación total (mm).

El desarrollo de las labores culturales fue manual y para el control de plagas y enfermedades se utilizaron productos químicos de etiqueta amarilla.

El contenido de agua en el suelo se midió con el sensor FDR, modelo Diviner 2000, la toma de datos fue dos veces por día, en la mañana y en la tarde y dos veces a la semana, el registro de datos fue a los 45 días de su desarrollo hasta los 165 días antes de la maduración del cultivo. Para la determinación del potencial hídrico se utilizó la cámara de presión Scholander, la toma de datos fue una vez por semana entre las 11:30 a 12:30 del mediodía. La temperatura del cultivo fue medida por el termómetro infrarrojo (modelo DT-380), la lectura fue dos veces por semana hasta los 160 días antes de la maduración.

Las variables evaluadas fueron el porcentaje de emergencia, altura de planta, número de ramas por planta, diámetro del tallo, número de vainas por planta, número de granos por vaina. La incidencia de la helada fue hallada en las plantas afectadas, mediante la relación del número de plantas dañadas con el número total de plantas multiplicadas por 100%. La severidad de helada fue considerando el número de hojas dañadas con relación al número total de hojas, multiplicada por 100%.

El índice de estrés hídrico del cultivo (IEHC), se calculó determinando la distancia relativa entre el límite inferior que representa las condiciones sin estrés y el límite superior representando al cultivo con estrés sin transpiración, se comparó las variables obtenidas de la diferencia entre la temperatura de cultivo y el aire, se utilizó el déficit de presión de vapor para el horario de la medición de 9:30 am a 3:30 pm en los meses de enero hasta abril donde se realizó el experimento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físicas y químicas del suelo

El suelo de la parcela experimental tuvo una textura franco arcilloso con 29% de arena, 35% de limo, 36% de arcilla, 0% de grava y 1.35 g cm⁻³ de densidad aparente. Villarroel (1998), menciona que los suelos formados por esta clase de textural, presentan alta capacidad de retención de humedad.

Según la FAO (2006) el cultivo de tarwi es propio de suelos pobres y marginales, pero se desarrolla mejor en suelos francos a franco arenoso, en ese sentido, el cultivo tuvo un buen desarrollo durante la investigación.

La Tabla 2 muestra los resultados del análisis químico del suelo, se observa que la capa arable de la parcela experimental presentó un pH ligeramente neutro de

6.76. Según Orsag (2010), los suelos más fértiles presentan reacciones cercanas al valor neutro (pH 5.5-7.5). Millones (1980), señala que los suelos con pH de 4 a 7 son los suelos más adecuados para este cultivo.

Tuvo una C.E. baja de 0.177 dS m⁻¹, por lo tanto no existieron problemas de sales que causaron daño al cultivo. Según Orsag (2010) la C.E. por encima de 4 dS m⁻¹ perjudica el crecimiento de las plantas, por tal motivo suelos con una C.E. < 4 dS m⁻¹ presentan una mejor fertilidad natural, se puede decir que el suelo de la parcela experimental fue apto para la implementación de cultivos sin restricciones.

La buena C.I.C. de 16.24 meq 100g⁻¹ se debe a la clase textural franco arcilloso porque la arcilla tiene mayor retención e intercambio de cationes, también mayor retención de agua. El porcentaje de Sat. Bas. es cercano a 100%, con 99.25%, corresponde a una disponibilidad de nutrientes muy alto, un alto porcentaje de la CIC está saturado con bases (Ca, Mg, K y Na) y no así con elementos de acidez (H, Al, Fe y Mn) pues su valor es mayor al 50% (Orsag, 2010).

El contenido de M.O. fue de 2.50%, son suelos de moderado contenido de M.O., con un contenido medio de N.T. de 0.17% y moderado P.A. de 42.73 ppm.

Tabla 2. Características químicas del suelo.

Cationes de cambio (meq 100g ⁻¹)						Sat. Bas.	M.O.	N.T	P.A.	pH en	pH en	C.E. dS m ⁻¹
Ca	Mg	Na	K	TIB	CIC	%	%	%	ppm	H ₂ O 1:5	KCl 1:5	1:5
12.15	2.17	0.36	1.44	16.12	16.24	99.25	2.50	0.17	42.7	6.76	5.24	0.177

C.I.C. = capacidad de intercambio catiónico; Sat. Bas. = saturación de bases; M.O. = materia orgánica; N.T. = nitrógeno total; P.A. = fósforo asimilable; C.E. = conductividad eléctrica.

Descripción del análisis del agua para riego

El agua en la Estación Experimental Choquenaira fue de buena calidad y apta para el riego, según los valores obtenidos, la conductividad eléctrica fue de 277 μS cm⁻¹ que corresponde a una calidad de agua excelente (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados del análisis químico del agua de riego.

Parámetros	Resultados	Unidades
PH	8.80	
Conductividad eléctrica	277.00	μS cm ⁻¹
Sodio	29.56	mg L ⁻¹
Potasio	8.53	mg L ⁻¹
Calcio	16.13	mg L ⁻¹
Magnesio	4.71	mg L ⁻¹
Cloruros	9.50	mg L ⁻¹
Carbonatos	38.25	mg L ⁻¹
Bicarbonatos	0.00	mg L ⁻¹
Sulfatos	51.45	mg L ⁻¹
Solidos suspendidos	6.00	mg L ⁻¹
Solidos totales	70.36	mg L ⁻¹
Solidos disueltos	62.55	mg L ⁻¹
Boro	0.70	mg L ⁻¹

Descripción de las características climáticas de la zona de estudio

Los resultados corresponden a la evaluación registrada en la gestión 2016 a 2017 en la Estación Experimental de Choquenaira. Según Espinoza (2010) la temperatura que requiere en cultivo de tarwi para un buen desarrollo es de 12 a 20°C, según Meneses (1996) la temperatura óptima es entre los 20 a 25°C.

Lescano (1994), señala que el tarwi presenta ecotipos que soportan temperaturas de 9.5°C, sin embargo, en la evaluación los máximos valores de temperatura ocurrieron en los meses de diciembre, febrero y marzo superando los 20.0°C, la temperatura mínima fue por debajo de 0°C en los meses de abril con -5.10°C y mayo con -8.30°C. Según Meneses (1996), el tarwi es susceptible a las heladas en etapas de emergencia, floración y formación de vainas, al registrarse -0,7°C los ecotipos fueron resistentes y no presento daño significativo, pero cuando la temperatura disminuyó a -5.10°C los daños fueron significativos causando daños en la fase de la formación de la vaina.

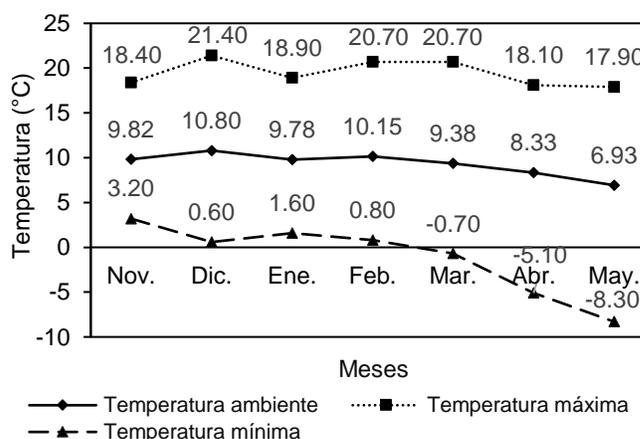


Figura 1. Temperatura máxima, mínima y ambiente.

Según Meneses (1996), la precipitación debe oscilar entre 350 a 700 mm, la planta requiere mayor cantidad

de agua durante la fase reproductiva (formación de flores y frutos). Se observó entre los meses de enero, marzo, abril y mayo una máxima precipitación, el valor de la ETo fue máximo en diciembre con 134.63 mm día⁻¹ (Figura 2).

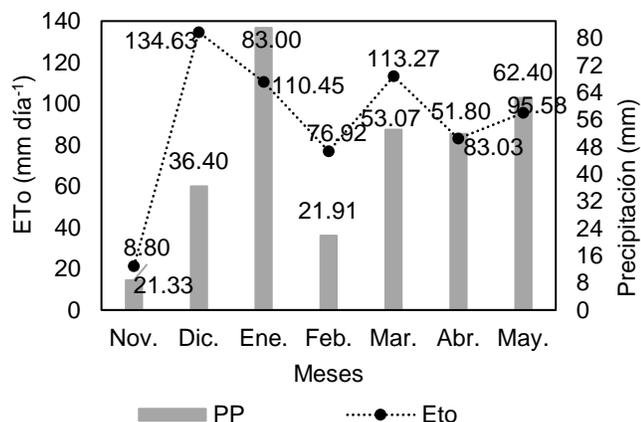


Figura 2. Comportamiento de la Eto y precipitación pluvial.

La humedad relativa manifestó condiciones adecuadas durante el desarrollo del cultivo (Figura 3) siendo mayor en el mes de marzo con 77.41% y mínima en diciembre con 65.41%.

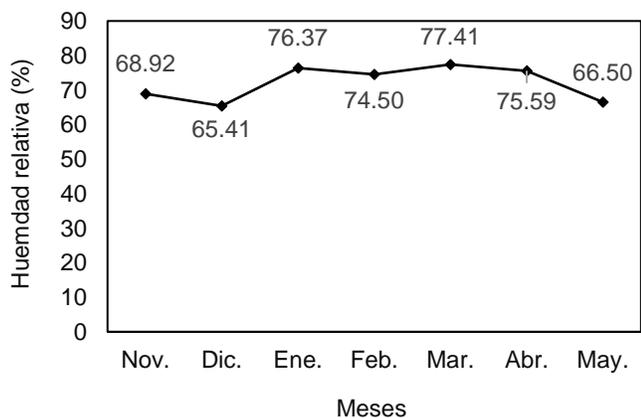


Figura 3. Comportamiento de la humedad relativa.

Los vientos predominantes en la zona tienen una dirección de Nor-Este, son secos y tuvieron una velocidad media de 1.76 m s⁻¹. La máxima velocidad del viento ocurrió en el mes de noviembre con 2.90 m s⁻¹, la mínima se dio en febrero con 1.18 m s⁻¹ (Figura 4). La velocidad del viento no fue amenaza para el desarrollo y producción del cultivo, pero facilitaron el aireado del follaje reduciendo la incidencia de enfermedades por hongos.

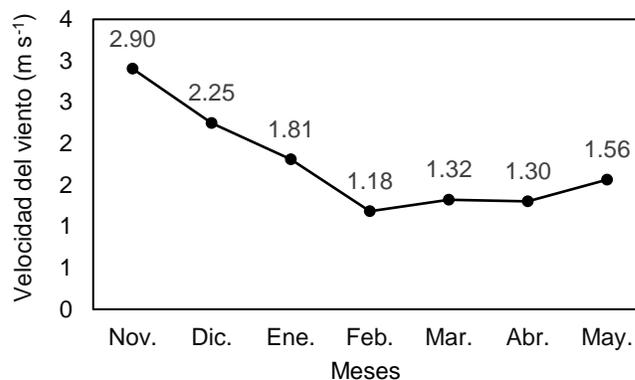


Figura 4. Comportamiento de la velocidad del viento.

Volumen aplicado de agua para riego y precipitación efectiva

El volumen de agua total aplicado para el riego con lámina de agua al 100% fue de 3681.21 m³ ha⁻¹, para la lámina al 75% fue 3321.20 m³ ha⁻¹ y para la lámina al 50% fue de 2961.20 m³ ha⁻¹.

Tabla 4. Volumen de agua total aplicada.

Niveles de riego	Volumen de agua aplicación de riego (L m ⁻²)	Volumen de agua (m ³ ha ⁻¹)	Volumen de agua total (riego + pe) (L m ⁻²)	Volumen de agua total (riego + pe) (m ³ ha ⁻¹)
100%	143.86	1438.60	368.12	3681.21
75%	107.89	1078.90	332.12	3321.20
50%	71.89	718.90	296.12	2961.20

Velocidad de infiltración básica

La Figura 5 muestra la curva de velocidad de infiltración, observándose que la lámina infiltrada parcial disminuye, de manera que en 60 min el valor de la infiltración se aproxima a 11.19 mm h⁻¹. La Figura 6 muestra la lámina acumulada, según Cuenca (1989) citado por Serrano (2000) estos valores se encuentran en el rango de 2.5 a 15.0 mm h⁻¹, dando a conocer que se trata de un suelo franco arcilloso.

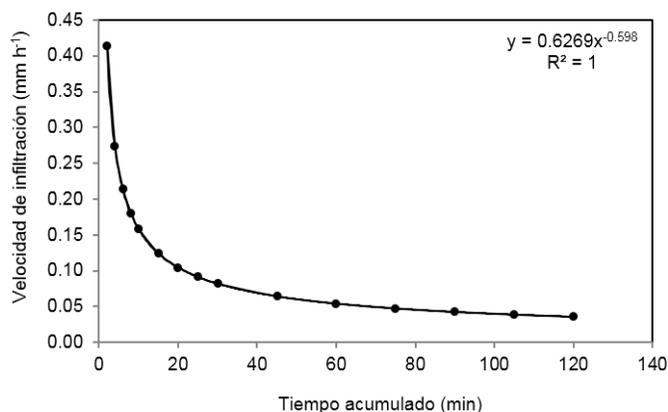


Figura 5. Velocidad de infiltración.

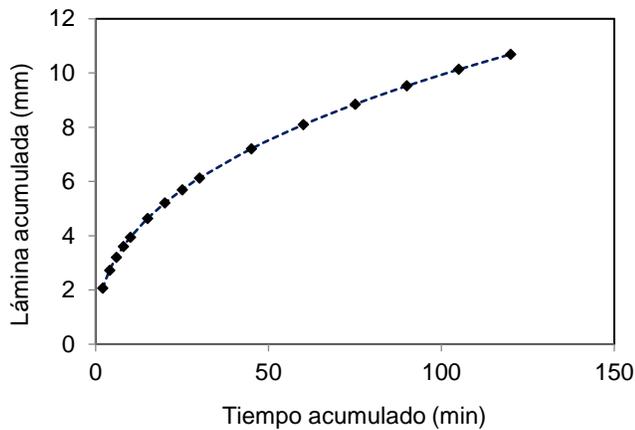


Figura 6. Lámina acumulada.

Índice de estrés hídrico

Límite inferior del índice de estrés

Se obtuvo el parámetro de la variable dependiente (diferencia de temperatura: $T_c - T_a$) e independiente (déficit de presión de vapor), con la que se realizó la regresión lineal (Figura 7). El 100% de lámina de riego obtuvo el modelo $T_c - T_a = 0.3237 \text{ DPV} - 3.4072$ con un coeficiente de determinación de 0.5619 y una aceptable relación entre las variables de 0.745.

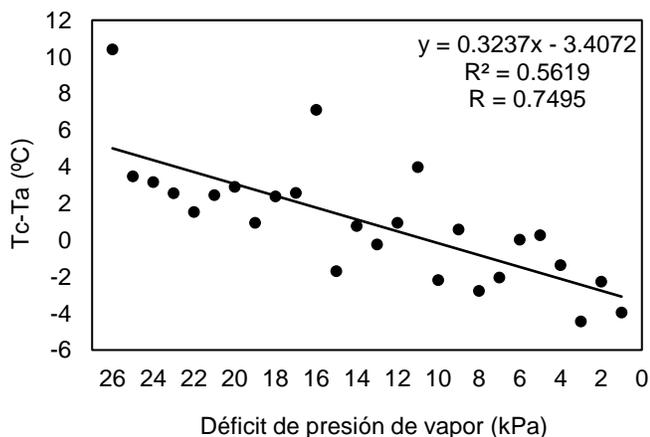


Figura 7. Límite inferior del cultivo de tarwi con 100% de lámina de riego.

Con el 75% de lámina de riego se determinó la relación importante entre el DPV con la diferencia de la temperatura del cultivo y aire, obteniendo el modelo de $T_c - T_a = 0.3359 \text{ DPV} + 1.4397$ con un coeficiente de determinación de 0.5815 y un coeficiente de correlación de 0.7605 (Figura 8).

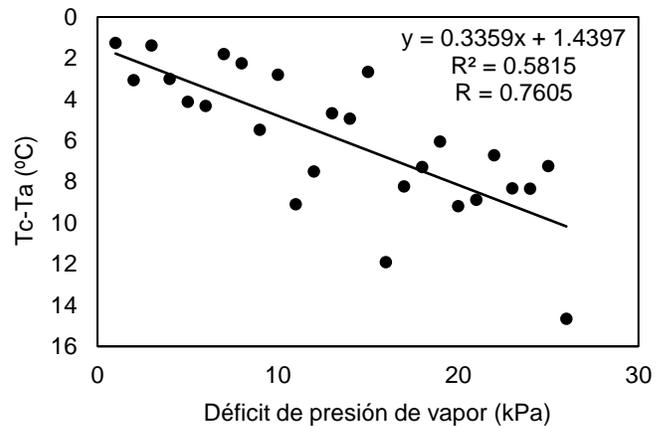


Figura 8. Límite inferior del cultivo de tarwi con 75% de lámina de riego.

Para el 50% de lámina de riego, se tuvo una relación media entre el DPV con la diferencia de la temperatura del cultivo y aire, obteniendo el modelo de $T_c - T_a = 0.348 \text{ DPV} + 6.2866$ con un coeficiente de determinación de 0.5462 y un coeficiente de correlación de 0.74 (Figura 9).

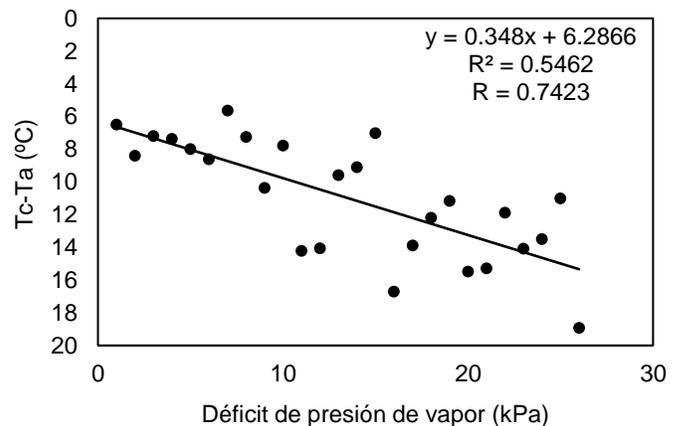


Figura 9. Límite inferior del cultivo de tarwi con 50% de lámina de riego.

Límite superior del índice de estrés

La línea horizontal o límite superior para el cálculo del IEHC, es la diferencia de la temperatura del aire y del cultivo asociada a períodos de mayor estrés dado por limitaciones de agua (50% de lámina de riego) cuando no existe transpiración por parte del cultivo. La Figura 10 muestra que se obtuvo 13.44°C con $n = 20$ realizando el promedio de los datos obtenidos del 50% de lámina de riego, durante el periodo de floración y formación de la vaina. López et al (2009), obtuvo un valor promedio de 2.8°C con $n = 25$, para el cultivo de

de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). El valor obtenido en la investigación, representa mayor tolerancia a un posible estrés hídrico.

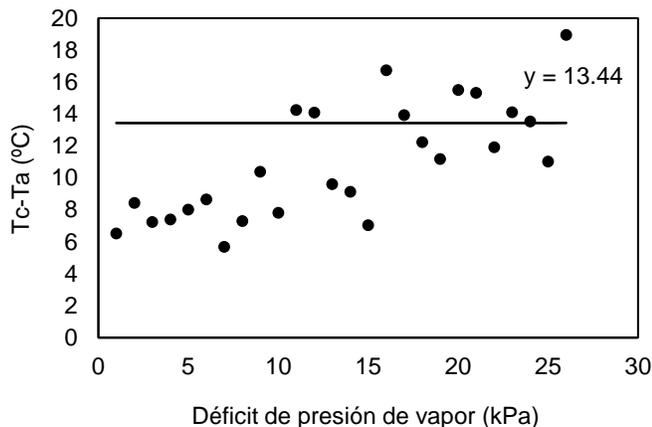


Figura 10. Límite superior del cultivo de tarwi (cultivo con estrés hídrico).

Índice de estrés hídrico del cultivo

Durante el periodo de evaluación hubo un adecuado suministro de agua, cubriendo los requerimientos fisiológicos y de evapotranspiración a diferentes DPV. El IEHC está determinado por la distancia relativa entre la línea inferior que representa las condiciones sin estrés y la línea superior donde no hay transpiración. Se considera que el límite inferior tiene un valor de $T_c - T_a = 1^\circ\text{C}$ correspondiente a un valor de DPV igual a 0.47 kPa. A partir de la definición de Idso (1982), la distancia entre el límite superior e inferior en 1.88 kPa es 11.73°C. De esta manera, el IEHC es igual que la razón de ambas distancias relativas $2.06/11.13 = 0.18$. Esto significa que una diferencia de temperaturas de 1°C entre el cultivo y el aire, puede originar problemas de estrés hídrico en el cultivo.

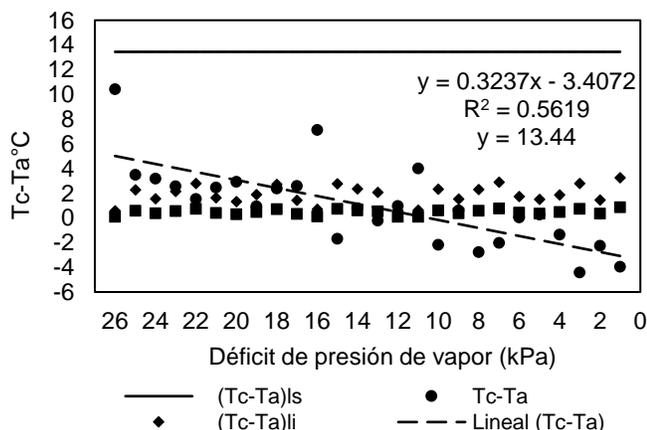


Figura 11. Límite superior e inferior del índice de estrés con 100% de lámina de riego.

En la Figura 12 se considera que el valor de $T_c - T_a$ es 5.97°C correspondiente a un valor de DPV de 0.46 kPa. A partir de la definición de Idso (1982), la distancia entre el límite superior e inferior en 0.99 kPa es 12.61°C . De esta manera, el IEHC es igual que la razón de ambas distancias relativas $5.97/12.61 = 0.48$. Esto significa que una diferencia de temperaturas de 5.97°C entre el cultivo y el aire, no puede originar problemas de estrés hídrico en el cultivo.

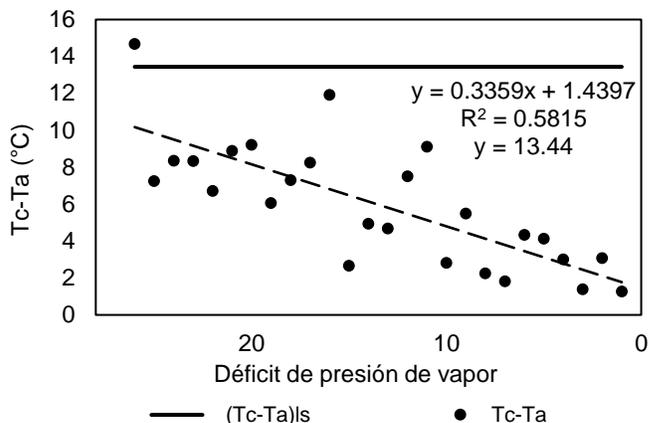


Figura 12. Límite superior e inferior del índice de estrés con 75% de lámina de riego.

En la Figura 13 se considera que el valor de $T_c - T_a$ es de 0.47°C correspondiente a un valor de DPV igual que 0.96 kPa. A partir de la definición de Idso (1982), la distancia entre el límite superior e inferior en 1.88 kPa es 11.73°C . De esta manera, el IEHC es igual que la razón de ambas distancias relativas $2.06/11.73 = 0.18$. Esto significa que una diferencia de temperaturas de 0.47°C entre el cultivo y el aire, puede originar problemas de estrés hídrico.

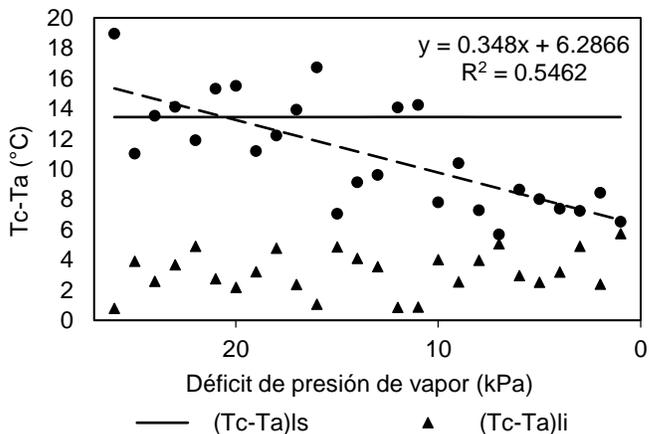


Figura 13. Límite superior e inferior del índice de estrés con 50% de lámina de riego.

Potencial hídrico del xilema

Para el 100% de lámina de riego, se tuvo un rango de -0.61 a -1.32 MPa, se observa que cuando la humedad del suelo (HV 100%) es baja entre 0.17 a 0.18% el potencial registrado es -0.61 MPa, se puede determinar que la planta se encuentra con déficit de agua en la fase de floración pero cuando la humedad es alta de 0.20 a 0.21% el potencial fue -1.32 MPa, ello significa que a mayor humedad se producen menores valores de potencial pues el cultivo no requiere retener con demasiada fuerza el agua en sus tejidos.

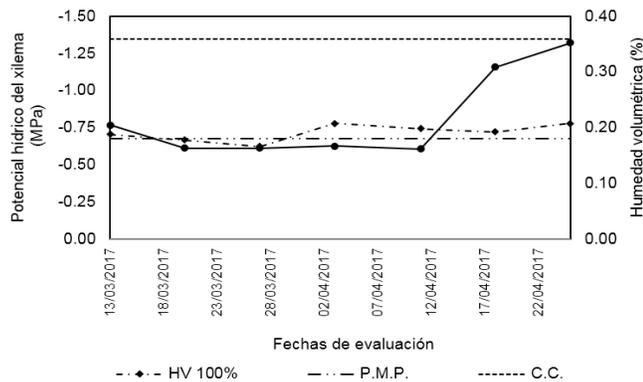


Figura 14. Medición del potencial hídrico del xilema con 100% de lámina de riego.

Para el 75% de lámina de riego, se tuvo un rango de -0.60 a -1.38 MPa para una humedad del suelo (HV 75%) oscila entre 0.28 y 0.36%, pero el contenido hídrico del cultivo de potencial registrado fue -0.60 a 0.72 MPa significa que la planta se encontró con déficit de agua en la fase de floración. Las características del suelo no permitieron el buen desarrollo de sus raíces, por lo que se produjo mayor potencial, pues el cultivo requirió retener con demasiada fuerza el agua en sus tejidos, pero en una humedad de 0.30 a 0.31% el potencial fue -1.38 MPa.

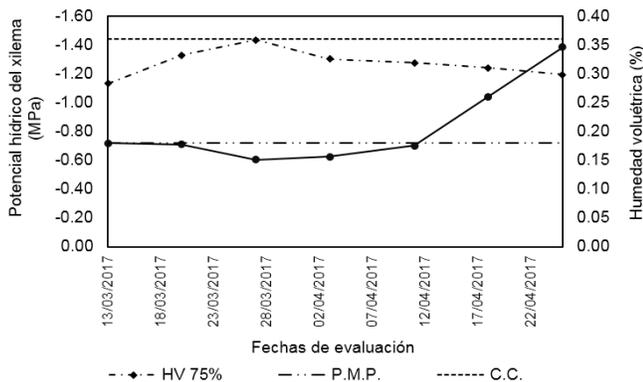


Figura 15. Medición del potencial hídrico del xilema con 75% de lámina de riego.

Para el 50% de lámina de riego se tuvo un rango de -0,58 a -1,31 MPa para una humedad del suelo (HV 50%) de 0.28 a 0.30%, el contenido hídrico del cultivo oscila entre -0.60 a 0.72 MPa indicando que la planta se encontró con déficit de agua en la fase de floración. Las características del suelo no permitieron el buen desarrollo de sus raíces, por lo que se produjo un mayor valor de potencial, pues el cultivo requirió retener con demasiada fuerza el agua en sus tejidos.

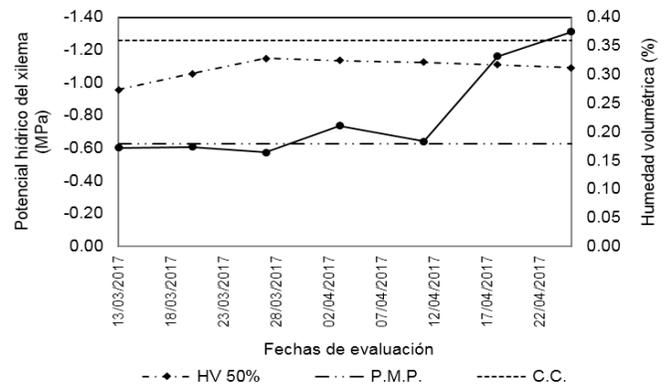


Figura 16. Medición del potencial del xilema con 50% de lámina de riego.

Contenido de humedad en el suelo

La Figura 17 muestra la fluctuación de la humedad a capacidad de campo y punto de marchitez permanente para las láminas de riego aplicadas. Se observa que para el 100% de lámina aplicada la humedad máxima fue de 36.6%, con el 75% de lámina aplicada el valor máximo de humedad fue del 28.6% y para el 50% de lámina se tuvo 19.8% de humedad. El comportamiento de las tres láminas de riego aplicadas durante el desarrollo del cultivo oscila entre el P.M.P. y C.C. lo que significa que el suelo tuvo el contenido adecuado de agua que requirió.

Según Cuenca (1989) citado por Serrano (2000) se establece que para un suelo de textura franco arcilloso, la humedad del suelo a capacidad de campo es del 36% y para el punto de marchitez permanente del 18%.

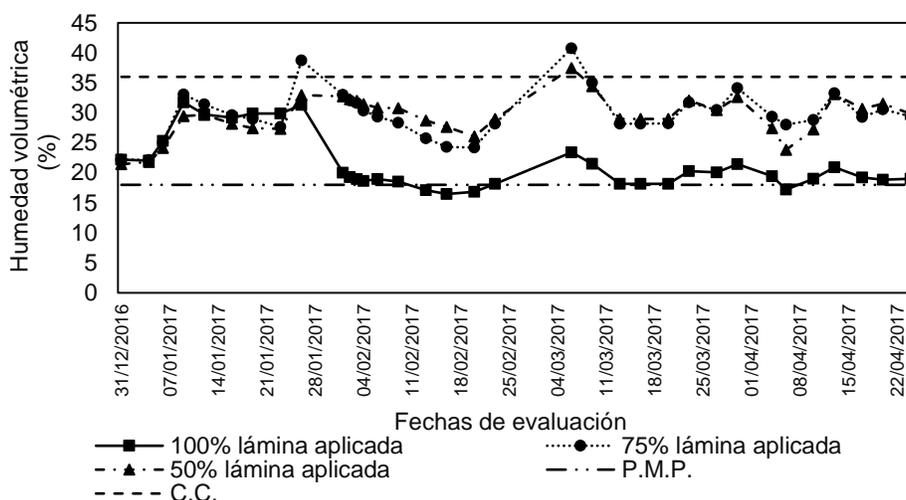


Figura 17. Humedad del suelo durante el desarrollo del cultivo.

Porcentaje de emergencia

El resultado del análisis de varianza (Tabla 5) muestra que no hubo diferencia significativa en los dos ecotipos de tarwi. La pendiente fue el factor bloqueado mismo que no influyó en la emergencia de los ecotipos.

Tabla 5. Análisis de varianza para el porcentaje de emergencia.

FV	GL	SC	CM	Fc	Pr>F	Sig.
Bloque	2	414.58	207.29	5.10	0.1639	ns
Ecotipo	1	253.13	253.13	6.23	0.1299	ns
Bloque x ecotipo	2	81.25	40.63	1.66	0.2495	ns
Lámina	2	14.58	7.29	0.30	0.7503	ns
Ecotipo x lámina	2	18.75	9.37	0.38	0.6937	ns
Error	8	195.83	24.48			
Total	17	978.13				

CV = coeficiente de variación = 5.68%; FV = fuentes de variación; GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = cuadrados medios; Fc = F calculado; Pr>F = probabilidad; Sig. = significancia; ns = no significativo.

El ecotipo Carabuco tuvo mayor porcentaje de emergencia con 90.83% y el ecotipo Copacabana con 83.33%. Callisaya (2012) y Plata (2016) en sus investigaciones con tarwi, determinaron el número de días a la emergencia desde la siembra, tomando en cuenta una emergencia superior al 50%. En el presente trabajo se obtuvo porcentajes de emergencia, más del 50% en ambos ecotipos.

Altura de planta

El análisis de varianza (Tabla 6) señala que no existieron diferencias en los bloques ni ecotipos de tarwi.

Tabla 6. Análisis de varianza para la altura de planta.

FV	GL	SC	CM	Fc	Pr>F	Sig.
Bloque	2	2358.11	1179.06	8.99	0.1001	ns
Ecotipo	1	2.46	2.46	0.02	0.9035	ns
Bloque x ecotipo	2	262.37	131.19	1.20	0.3512	ns
Lámina	2	37.28	18.64	0.17	0.8467	ns
Ecotipo x lámina	2	541.85	270.92	2.47	0.1461	ns
Error	8	877.47	109.68			
Total	17	4079.54				

CV = 7.41%

Al 75% de lámina de riego, se tuvo un promedio de altura de planta de 143 cm, con 100% de lámina de riego se obtuvo una altura de 140 cm. Asimismo, con el ecotipo Copacabana el promedio de altura fue de 142 cm y con el ecotipo Carabuco fue 141 cm.

Callisaya (2012) obtuvo una altura promedio de 82 cm para el ecotipo de Carabuco. Quenallata (2008), en su estudio con diferentes ecotipos de tarwi en el municipio de Ancoraimas reporta promedios de 65.0 a 105.3 cm.

Número de ramas por planta

El análisis de varianza indica que existieron diferencias significativas entre láminas de riego, y no hubo diferencias entre los ecotipos evaluados.

Así también, se observa que no hubo diferencias significativas en la interacción del ecotipo y láminas de riego, lo cual indica que ambos factores fueron independientes sobre el número de ramas (Tabla 7).

Tabla 7. Análisis de varianza para el número de ramas por planta.

FV	GL	SC	CM	Fc	Pr>F	Sig.
Bloque	2	29.52	14.76	3.26	0.2345	ns
Ecotipo	1	0.02	0.02	0.01	0.9476	ns
Bloque x ecotipo	2	9.04	4.52	4.54	0.0482	ns
Lámina	2	33.39	16.70	16.76	0.0014	*
Ecotipo x lámina	2	3.70	1.85	1.86	0.2178	ns
Error	8	7.97	1.00			
Total	17	83.65				

CV = 6.72%; * = significativo.

La prueba de media de Duncan (Tabla 8) indica que con el 50% de lámina de riego se tuvo mayor número de ramas de 16.67, con el 75% se obtuvo 14.50 y con el 100% de lámina de riego se tuvo 13.39 ramas por planta.

Tabla 8. Prueba de medias de Duncan para el número de ramas por planta.

Lámina de riego	Media	Grupos
50%	16.67	A
75%	14.50	B
100%	13.39	B

Los ecotipos Copacabana y Carabuco tuvieron un promedio similar de 15 ramas por planta. Según Quenallata (2008), en un estudio comparativo de cinco ecotipos en dos comunidades del municipio de Ancoraimas, registró mayor número de ramas para la variedad Sapanina con 11.50. Según Callisaya (2012), el número de ramas en promedio fue cinco para el ecotipo Carabuco.

Diámetro del tallo por planta

El análisis de varianza (Tabla 9) indica que no existieron diferencias significativas en todas las variables evaluadas.

Tabla 9. Análisis de varianza para el diámetro del tallo por planta.

FV	GL	SC	CM	Fc	Pr>F	Sig.
Bloque	2	22.69	11.35	4.40	0.1853	ns
Ecotipo	1	0.20	0.20	0.08	0.8066	ns
Bloque x ecotipo	2	5.16	2.58	0.54	0.6005	ns
Lámina	2	4.70	2.35	0.49	0.6272	ns
Ecotipo x lámina	2	9.83	4.91	1.04	0.3981	ns
Error	8	37.97	4.75			
Total	17	80.55				

CV = 8.30%

Resultado de la evaluación se tiene que con el 75% de lámina de riego el diámetro del tallo en promedio fue de 26.68 mm, con el 100% de lámina de riego fue 25.53 mm y con el 50% de lámina de riego de 26.54 mm. Asimismo, el ecotipo Copacabana tuvo 26.35 mm de diámetro del tallo y el ecotipo Carabuco 26.14 mm.

Número de vainas por planta

El análisis de varianza (Tabla 10) indica que hubo diferencias significativas producidas por el factor láminas de riego, se observa que no existieron diferencias significativas entre los ecotipos, asimismo, no se encontró diferencias significativas en la interacción del ecotipo y láminas de riego, lo cual indica que ambos factores son independientes.

Tabla 10. Análisis de varianza para el número de vainas por planta.

FV	GL	SC	CM	Fc	Pr>F	Sig.
Bloque	2	61.78	30.89	2.84	0.2606	ns
Ecotipo	1	20.06	20.06	1.84	0.3076	ns
Bloque x ecotipo	2	21.78	10.89	5.30	0.0343	ns
Lámina	2	84.78	42.39	20.62	0.0007	*
Ecotipo x lámina	2	0.11	0.06	0.03	0.9734	ns
Error	8	16.44	2.06			
Total	17	204.94				

CV = 2.71%

El resultado de la prueba de medias, muestra que con el 50% de lámina de riego, se tuvo en promedio 56 vainas por planta, superior al 75 y 100% de lámina de riego que obtuvieron valores bajos (Tabla 11).

Tabla 11. Prueba de medias de Duncan para el número de vainas por planta.

Lámina de riego	Media	Grupos
50%	56.00	A
100%	51.67	B
75%	51.17	B

El ecotipo Copacabana obtuvo un promedio 54 vainas por planta y el ecotipo Carabuco 52 vainas. Quenallata (2008), en un estudio comparativo de cinco ecotipos en dos comunidades del municipio de Ancoraimas, indica que la variedad Sisani obtuvo 34.4 vainas por planta en la comunidad de Cohani y el ecotipo Turrini en la comunidad de Chejepampa Centro tuvo 22.9 vainas.

Número de granos por vaina

El análisis de varianza indica que existieron diferencias significativas entre láminas de riego y no así en las demás variables evaluadas (Tabla 12).

Tabla 12. Análisis de varianza para el número de granos por vaina.

FV	GL	SC	CM	Fc	Pr>F	Sig.
Bloque	2	0.33	0.17	0.43	0.7000	ns
Ecotipo	1	0.22	0.22	0.57	0.5286	ns
Bloque x ecotipo	2	0.78	0.39	0.87	0.4533	ns
Lámina	2	16.30	8.17	18.30	0.0010	*
Ecotipo x lámina	2	0.78	0.39	0.87	0.4533	ns
Error	8	3.56	0.44			
Total	17	22.00				

CV = 10.0%

La Tabla 13 muestra que con el 50% de lámina de riego se obtuvo 8.00 granos por vaina, superior al 75 y 100% de lámina de riego.

Tabla 13. Prueba de medias de Duncan para el número de granos por vaina.

Lámina de riego	Media	Grupos
50%	8.00	A
75%	6.17	B
100%	5.83	B

Los ecotipos Copacabana y Carabuco mostraron valores similares del número de vainas por planta que fueron de 6.78 y 6.56 respectivamente. Tarquino et al. (2004), en un estudio en la comunidad de Amarete, en los ecotipos 37-D, 297-E y 122-F consiguieron seis granos por vaina, mientras en los ecotipos 301-B y 321-C fue cinco granos por vaina. Los resultados se asemejan con el presente estudio.

Efecto de la helada

Incidencia

Los ecotipos Copacabana y Carabuco tuvieron un valor similar de coeficiente de correlación 0.899 y 0.9058 (Figura 18), expresando una relación significativa entre las variables de diferencia de temperatura e incidencia de helada. La incidencia de la helada en el ecotipo Copacabana a -0.7 y -0.4°C tiene una incidencia 2.22 y 1.39% de daño, dato no significativo. A una temperatura de -3.9°C la incidencia fue de 25.28% pero a una temperatura de -4.3 y -5.1°C tuvo una incidencia 76.67 y 87.78%, causando daño significativo con una pérdida del cultivo.

El ecotipo Copacabana a una temperatura -0.7 y -0.4°C tuvo una incidencia 1.11 y 2.22% de daño, este dato fue no significativo, a una temperatura de -3.9°C la incidencia fue del 23.61% pero a una temperatura de -4.3 y -5.1°C se tuvo incidencia del 74.72 y 88.06%, esto causo daño significativo con pérdida del cultivo.

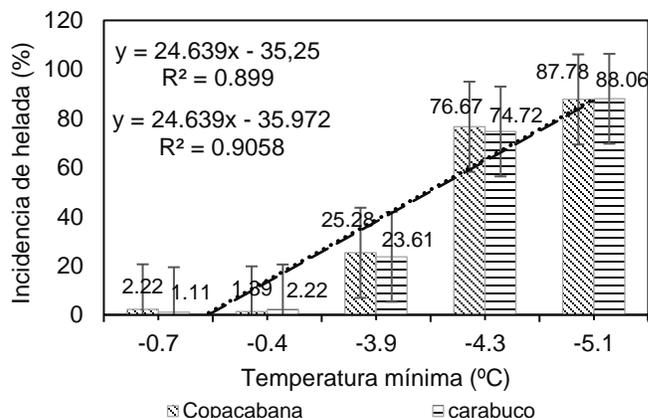


Figura 18. Promedio del porcentaje de incidencia de la helada en los ecotipos evaluados.

Severidad

Ambos ecotipos presentaron similitud en el coeficiente de correlación con 0.9718 y 0.9205 (Figura 19), expresando una relación significativa entre la diferencia de temperatura y la severidad de la helada. La severidad de la helada en el ecotipo Copacabana a una temperatura -0.7 y -0.4°C tuvo una incidencia del 14.74 y 22.26% de daño, a una temperatura de -3.9°C la severidad fue del 43.48% pero a una temperatura de -4.3 y -5.1°C tuvo una severidad del 64.11 y 90.15%, lo que causó daño significativo con pérdida del cultivo.

El ecotipo Carabuco a una temperatura -0.7 y -0.4°C tuvo una incidencia 18.33 y 20.11% de daño, a una temperatura de -3.9°C la severidad fue del 36.16%, y con una temperatura de -4.3 y -5.1°C tuvo una severidad del 70.85 y 87.27%, causando daño significativo al cultivo. PROINPA (2009), indica que cuando el daño de la parte aérea de la planta es superior al 50% durante la formación de estolones, la planta afectada ya no tiene capacidad de recuperación.

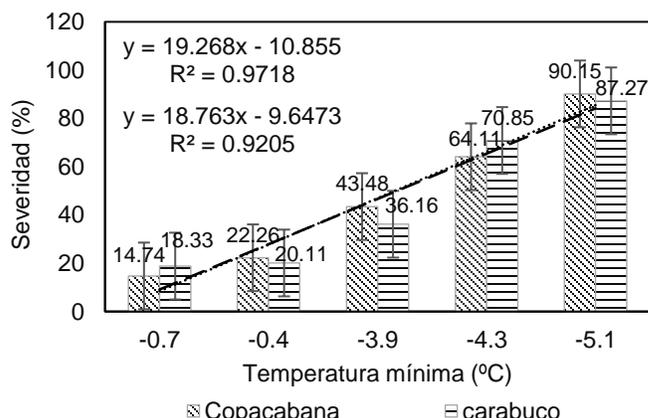


Figura 19. Promedio del porcentaje de severidad en los ecotipos evaluados.

CONCLUSIONES

Se observó que las variables número de rama, número de vaina, número de grano por vaina tuvieron diferencias significativas bajo el efecto de las láminas de riego aplicadas al 50, 75 y 100%. La prueba de Duncan en todos los casos mostró la formación de dos grupos, donde el grupo A, estuvo conformada por el 50% de lámina de riego y las demás láminas formaron el grupo B.

La cantidad de agua aplicada fue de 1438.60 m³ ha⁻¹ para 100% de lámina de riego, 1078.90 m³ ha⁻¹ para 75% de lámina de riego y 718.90 m³ ha⁻¹ para el 50% de lámina de riego. Asimismo, se observó una relación directamente proporcional entre temperatura de aire, humedad relativa, evapotranspiración, donde al aumentar o disminuir la radiación solar, también aumentan o disminuye el comportamiento de dichas variables.

El tarwi se encuentra influenciado por la escasez del agua, el estrés hídrico produce mayor retención de agua en sus tejidos. En condiciones de extrema sequedad del ambiente en el Altiplano se produce estrés a los cultivos incluso cuando estos cuentan con suficiente humedad.

Mediante el análisis del límite inferior y superior del índice de estrés hídrico del cultivo, se determinó una relación importante entre el déficit de presión de vapor con la diferencia de la temperatura del cultivo y aire durante el desarrollo del cultivo en los horarios de 9:00 am a 03:30 pm.

A causa de las bajas temperaturas, se registró elevada incidencia de la helada en los ecotipos Copacaba y Carabuco de 87.78 y 88.6% respectivamente para una temperatura de -5.1°C. La severidad de la helada fue de 90.15% para el ecotipo Copacabana y 87.27% para el ecotipo Carabuco a una temperatura de -5.1°C.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo de investigación fue desarrollado gracias al proyecto "Programación de riego deficitario controlado en cultivos andinos de papa (*Solanum tuberosum*), papalisa (*Ullucus tuberosus*) y tarwi (*Lupinus mutabilis*) mediante sensores, para un uso racional del agua como medida frente al cambio climático, en el municipio de Viacha" que brindó su apoyo orientado a la tesis de licenciatura.

BIBLIOGRAFÍA

Calzada, J. 1982. Métodos estadísticos para la investigación. Quinta edición. Ed. Milagros. Lima, Perú. 644 p.

Callisaya, I. 2012. Comportamiento agronómico del cultivo de tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet.) bajo dos métodos y tres densidades de siembra en la localidad de Carabuco. Tesis de licenciatura. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 64 p.

Chilón, E. 1997. Manual de fertilidad de suelos y nutrición de plantas. CIDAT, Primera edición, La Paz, Bolivia. 185 p.

Espinoza, E. 2010. Tarwi como alternativa para la crisis alimentaria. La Paz, Bolivia.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2006. Manual de cultivos Orgánicos y Alelopatía, Colombia, p. 161.

Gross, R., Baer, E., Koch, F., Marquard, R., Trugo, L., Wink, M. 1988. Chemical composition of a new variety of the Andean lupin (*Lupinus mutabilis* cv. Inti) with low alkaloid content. J. Food Comp. Anal. 1, pp. 353-361.

Gross, R. 1982. El cultivo y la utilización del tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet). Estudio FAO: Producción y Protección Vegetal. No. 36. FAO, Roma. 236 p.

INIAP (Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal). 2009. Registro Nacional de Variedades. Edición primera. La Paz, Bolivia.

Dso, S.B. 1982. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. Agric. Meteorol. 27: 59-70.

Kostiakov, A.N. (1932). On the dynamics of the coefficient of water - percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of ameliation. Trans. Intern. Soc. Soil Sci., Moscow. pp. 17-21.

Lescano, J.L. 1994. Genética y mejoramiento de cultivos altoandinos. Programa Interinstitucional de waru waru. Convenio: INADE/PELT COTESU, Puno, Perú.

López, R., Arteaga, R., Vázquez, M., López, L., Sánchez, I., Ruiz., A. 2009. Índice de estrés hídrico del cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot). Revista Chapingo, serie Horticultura. v. 15, n. 3, 259-267.

Meneses, R. 1996. Las leguminosas en la agricultura boliviana. Proyecto. Rhizobiología Bolivia. CIAT-CIF-PNLG-CIFP-WALL. Cochabamba, Bolivia. pp. 209-225.

Millones, P. M. 1980. Importancia Socio Económica del cultivo de tarwi. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas - OEA. Dirección Regional de Agricultura y Alimentación. Serie de informes de conferencias, cursos y reuniones N° 210. Perú. pp. 100-107.

Morlon, P. 1992. Apuntes sobre problemas de heladas, aspectos meteorológicos. Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional. Proyecto colza y cereales. Puno, Perú. pp. 8-33.

Orsag, V. 2010. El recurso suelo: principios para su manejo y conservación. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. La Paz, Bolivia. pp. 1-7.

PROIMPA, 2009, Informe compendio de la conservación de la riqueza genética de los cultivos andinos. Cochabamba, Bolivia. 12 p.

Quenallata, J. 2008. Evaluación de variables agronómicas de cinco ecotipos de tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet.) en dos comunidades del municipio de Ancoraimes. Tesis de licenciatura. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 101 p.

Serrano, G. 2014. Ingeniería del riego tecnificado. Primera edición. La Paz Bolivia. 181 p.

Tarquino, T., Marina, H., Chura, G. 2004. Estudio de leguminosas. Memoria de CIPCA. Apolobamba. La Paz, Bolivia. 30 p.

Villarroel, J. 1998. Manual para la interpretación de análisis de suelos y recomendaciones. Ed. Tokio. Santa Cruz, Bolivia. 81 p.

Artículo recibido en: 15 de julio 2018

Aceptado en: 14 de septiembre 2018