



**UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
MAGÍSTER EN HORTOFRUTICULTURA**

**DESARROLLO DE ESTRATEGIAS PRODUCTIVAS PARA MEJORAR EL
RENDIMIENTO EN LEGUMINOSAS DE GRANO, LENTEJA (*LENS CULINARIS
MEDIK.*) Y POROTO (*PHASEOLUS VULGARIS L.*) EN EL SECANO DE LA
REGIÓN DEL MAULE, CHILE.**

**POR
RAMÓN ANTONIO AMIGO MIGUELES**

**PROFESOR TUTOR: Ing. Agr., Ph. D. Ricardo Alfonso Cabeza Pérez
CO-TUTORA: Ing. Agr., M. Sc., Dra. Ana María Méndez Espinoza**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER

**TALCA - CHILE
2021**

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su unidad de procesos técnicos certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Talca, 2022

Título: Desarrollo de estrategias productivas para mejorar el rendimiento en leguminosas de grano, lenteja (*Lens culinaris* Medik.) y poroto (*Phaseolus vulgaris* L.) en el secano de la región del Maule, Chile.

Estudiante: Ramón Antonio Amigo Migueles

Fecha de inicio de la tesis: mayo de 2018

Fecha de término de la tesis: octubre de 2021

Profesor tutor: Ing. Agr., Ph. D. Ricardo Alfonso Cabeza Pérez
Profesor Asistente
Escuela de Agronomía Facultad de Ciencias Agrarias

Profesora co-tutora: Ing. Agr., M. Sc., Dra. Ana María Méndez Espinoza
Investigadora
Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA Remehue

Fecha de presentación de Memoria de Título 05 de octubre de 2021

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo de mi profesor tutor Dr. Ricardo Cabeza por su confianza, disponibilidad e infinita paciencia. También agradecer el apoyo de mi profesora cotutora Dr. Ana María Méndez por su abnegada voluntad y disposición en todo este proceso. Agradezco al proyecto “Desarrollo de ingredientes funcionales y aditivos especializados para la valorización de la pequeña y mediana agricultura de secano” PYT 2017-0490, por el financiamiento de los experimentos de campo en los que se desarrolló esta tesis, como también agradezco a los agricultores y profesionales de los prodesales de Chanco y Curepto por participar activamente de las diferentes actividades realizadas.

A mi familia, especialmente a mi madre, por su esfuerzo, confianza y apoyo en cada momento de mi vida, a mi padre por enseñarme a luchar por mis objetivos, a mi otra madre, Marcela por el cariño y por ser un pilar fundamental en este camino y etapa de la vida. A mis amigos Marcela y Roberto por el apoyo y la amistad sincera.

A Ricardo Pérez, Jorge Pérez y Basilio Carrasco por su apoyo constante durante este último tiempo, ya que sin su ayuda no podría haber terminado este proceso.

Finalmente dar gracias a la vida, que me dio la oportunidad de seguir estudiando lo que me apasiona.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE	I
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
I.-INTRODUCCIÓN GENERAL	1
I.1.- Las legumbres	1
I.1.1.- Descripción botánica de las legumbres	1
I.1.2.- Aspectos genéticos de las leguminosas	2
I.2.- Producción de legumbres de grano: lentejas y porotos	3
I.3.- Contexto histórico de la producción de lentejas y porotos a nivel nacional	5
I.4.- Manejo agronómico de leguminosas de grano	9
I.4.1.- Fertilización	9
I.4.2.- Requerimiento hídrico	10
I.4.3.- Aspectos relacionados a enfermedades	11
I.4.4.- Malezas	11
I.5.- Lentejas	13
I.5.1.- Origen y evolución	13
I.5.2.- Manejo agronómico del cultivo de la lenteja	14
I.5.2.1.- Fertilización	14
I.5.2.2.- Requerimiento hídrico	15
I.5.2.3.- Enfermedades	16
I.5.2.4.- Malezas	16
I.5.3.- Caracterización de la zona en estudio, Chanco	17
I.5.4.- Principal limitante productiva identificada en el cultivo de la lenteja; Chanco	18

I.5.4.1.- Desordenes nutricionales en lentejas	19
I.6.- Porotos	20
I.6.1. Origen y evolución	20
I.6.2.-Manejo agronómico del cultivo del poroto	21
I.6.2.1.- Fertilización	21
I.6.2.2.- Requerimiento hídrico	22
I.6.2.3.- Enfermedades	22
I.6.2.4.- Malezas	23
I.6.3.- Caracterización de la zona en estudio, Curepto	24
I.6.4.- Principales limitantes productiva identificadas en el cultivo del poroto; Curepto	26
I.6.4.1.- Brote severo de <i>Fusarium</i> en poroto	27
I.7.- Consideraciones	27
I.8.- Hipótesis general de trabajo	28
I.9.- Objetivo general	28
I.9.1.- Objetivos específicos	28
CAPITULO I	29
CAPITULO II	53
CAPITULO III	76
CAPITULO IV	113
II.-DISCUSION GENERAL	116
II.1.- Capítulo I	116
II.2.- Capítulo II	117
II.3. Capítulo III	117
II.4.- Capítulo IV	118
II.5.- Adopción de las mejoras propuestas	119

III.- CONCLUSIONES	121
IV.- BIBLIOGRAFÍA	123
V.- ANEXOS	145

RESUMEN

Históricamente Chile ha sido un importante productor de leguminosas de grano, llegando a ser un exportador en el pasado. En la actualidad, la producción de leguminosas de grano en nuestro país se concentra mayoritariamente en el secano de la región del Maule, siendo los cultivos de poroto y lenteja los más importantes. La producción en términos generales se encuentra deprimida, dadas condiciones como bajos rendimientos asociados a deficiencias en el manejo de fertilización, escaso uso de variedades mejoradas, y nulo manejo del recurso hídrico. Limitantes productivas que han ido en desmedro de la productividad de los campos restringiendo la competitividad de estos cultivos en relación a los granos importados. Sin embargo, en el secano los pequeños agricultores continúan sembrando leguminosas empleando bajos niveles de tecnología y con técnicas de cultivo tradicionales.

El objetivo central de este trabajo fue identificar las brechas productivas en los cultivos de lentejas y porotos, establecer estrategias de producción apuntando, en lentejas, al uso racional de la fertilización nitrogenada y a la evaluación de genotipos en condiciones de producción. De igual forma en porotos se evaluó el comportamiento de cultivares comerciales bajo dos niveles de fertilización nitrogenada y regímenes hídricos contrastantes. En ambos casos las modificaciones buscan aumentar la productividad y calidad de las legumbres.

Como resultado de los ensayos de campo en lenteja, no se encontraron diferencias entre la inoculación de semillas con *Rhizobium* y la aplicación de 30 kg N ha⁻¹, destacando el ecotipo Vega con un rendimiento de 27,1 qq ha⁻¹. Por su parte en porotos, una disminución en un 30,8% de la fertilización nitrogenada y de un 46,6% del agua aplicada al utilizar un sistema de riego por goteo, no afectaron el rendimiento ni la calidad de los granos. La variedad Zorzal bajo sistema de riego por goteo alcanza un rendimiento de 40,1 qq ha⁻¹ superior al rendimiento promedio de la zona de 25 qq ha⁻¹. Adicionalmente, se identificaron las principales limitantes productivas para cada cultivo, siendo para lentejas la toxicidad por hierro y manganeso y en poroto la pérdida de plantas ocasionada por *Fusarium oxysporum*. Finalmente, la implementación de las prácticas de manejo evaluadas para ambos cultivos permitiría subsanar las brechas productivas de los agricultores en la principal zona productora de leguminosas de grano en Chile.

Palabras clave: leguminosas de grano, manejo agronómico, genotipos, fijación biológica, nitrógeno, recurso hídrico.

ABSTRACT

Chile has historically been an important producer of grain legumes, becoming an exporter in the past. Recently, the production of grain legumes in our country is mainly concentrated in the dry land of the Maule region, being the beans and lentils the most important crops. Production has decreased generating low yields associated with deficiencies in fertilization management, no use of improved varieties, and no management of water resources. These limitations have negative effect on productivity of these crops, restricting the competitiveness of them compared to imported grains. However, in the rainfed, farmers continue to cultivating legumes using low levels of technology and traditional cultivation techniques.

The main objective of this work was to identify the productive gaps in lentil and bean crops, to establish production strategies aiming, in lentils, at the rational use of nitrogen fertilization and the evaluation of genotypes under productivity conditions. Similarly, in beans, the behavior of commercial cultivars under two levels of nitrogen fertilization and contrasting water regimes was evaluated. In both cases, the modifications seek to increase the productivity and quality of the legumes.

As a result of field trials in lentils, no differences were found between the inoculation of seeds with *Rhizobium* sp. and the application of 30 kg N ha⁻¹, highlighting the Vega ecotype with a yield of 27.1 qq ha⁻¹. On the other hand, in beans, the yield and quality of grain were not affected, when nitrogen fertilization was reducing 30.8% and 46.6% in the water applied when using a drip irrigation system. The Zorzal variety under drip irrigation system achieved a yield of 40.1 qq ha⁻¹ that was higher than average yield of the area (25 qq ha⁻¹). Additionally, the main productive limitations were identified for each crop, with iron and manganese toxicity for lentils and for beans the loss of plants caused by *Fusarium oxysporum*.

Finally, the implementation of the management practices evaluated for both crops would make it possible to fill the productive gaps of farmers in the main grain legume producing area in Chile.

Keywords: grain legumes, agronomic management, genotypes, biological fixation, nitrogen, water resources.

I. INTRODUCCIÓN GENERAL

I.1.- Las legumbres

La familia *Fabaceae* es un grupo que reúne a 19.500 especies en 751 géneros de plantas (LPWG, 2013). Poseen una amplia diversidad morfológica que va desde plantas anuales hasta árboles y una distribución cosmopolita (Lewis *et al.*, 2013). El 33% de la proteína que consume el ser humano a nivel mundial proviene de las legumbres que solo es superada en importancia por los cereales (Llamas y Acevedo, 2016; Sikora y Greco, 1990).

I.1.1.- Descripción botánica de las legumbres

Dentro de la familia *Fabaceae* existen distintos hábitos de crecimiento, tanto perennes (árboles y arbustos) como anuales (plantas herbáceas). Las flores pueden ser actinomorfas (simetría radial) o zigomorfas (plano de simetría bilateral) (Strasburger *et al.*, 2002). El principal rasgo que agrupa a este tipo de plantas es su fruto, denominado legumbre, cuya característica es ser una vaina dehiscente (Scagel *et al.*, 1984). Del total de especies, solo algunas son de importancia agronómica, entre ellas encontramos plantas provenientes de los géneros *Cicer*, *Cajanus*, *Glycine*, *Faba*, *Lens* y *Phaseolus* (Nwokolo y Smartt, 1996).

La característica distintiva de las leguminosas, es que son capaces de fijar N_2 desde la atmósfera en simbiosis con bacterias y reducirlo a amoníaco (NH_3) en estructuras radiculares especializadas llamadas nódulos (Bøckman, 1997; Moore, 1974). Esta habilidad es de gran importancia para la entrada de N a los sistemas terrestres, tanto naturales como agrícolas (Dixon y Kahn, 2004; Herridge *et al.*, 2008). Debido a esta capacidad, las leguminosas reducen sus necesidades de ser fertilizadas con nitrógeno durante el ciclo de desarrollo, y adicionalmente, la incorporación de residuos vegetales aumenta el N orgánico del suelo (Shah *et al.*, 2003). Este beneficio es aprovechado en la agricultura mediante la rotación de cultivos (Espinoza *et al.*, 2011; Espinoza *et al.*, 2015; Peoples *et al.*, 2009; Rochester *et al.*, 1998). Los incrementos del rendimiento en cultivos sembrados después de la cosecha de leguminosas, son a menudo, equivalentes a los esperados con aplicaciones de 30 a 80 kg de N por ha (Zahran, 1999).

I.1.2.- Aspectos genéticos de las leguminosas

La familia de las leguminosas posee una gran biodiversidad biológicas y genética debido a que el gran número de especies pertenecientes a esta familia poseen características genéticas diferentes entre individuos, lo que genera oportunidades para el mejoramiento y búsqueda de nuevas variedades que se adapten a condiciones adversas de producción, como son estrés hídrico, resistencia y/o tolerancia a plagas y enfermedades (Beebe et al., 2008; Mayor-Duran et al., 2016; Saha et al., 2018; Mousavi-Derazmahalleh et al., 2019). Por lo tanto, conocer la diversidad genética de las leguminosas es importante para el desarrollo de nuevo material genético que se adapte a condiciones de estrés biótico y abiótico. Sin embargo, la diversidad genética en las plantas domesticadas se ha reducido enormemente, por lo que la búsqueda de diversidad se hace analizando los ancestros silvestres (Mousavi-Derazmahalleh et al., 2019).

El estudio de la evolución de las legumbres se ha realizado mediante la subclasificación de la familia de las fabáceae en subfamilias. Estas subfamilias son: Mimosoideae, Caesalpinioideae y las Papilionoideae (Doyle y Luckow, 2003). El grupo de las papilionáceas agrupa a las legumbres de interés agrícola (Varshney et al., 2009). El avance tecnológico, en los últimos 30 años de la filogenética (ciencia que estudia el parentesco entre las especies), ha permitido comprender la evolución de este grupo de plantas, se han determinado cuatro clados (*clades*) o ancestros comunes para un gran número de especies de leguminosas, estos son: galegoide u hologalegina; phaseoloide o millettioide; dalbergioide; y genistoide (Choi et al., 2004; Doyle et al., 2013; Varshney et al., 2009). Existen dos clados que agrupan al mayor número de especies de importancia agrícola, el clado galegoide o herbáceas de estación fría, donde podemos encontrar especies ampliamente estudiadas como *Lotus japonicus* y *Medicago truncatula* o plantas de importancia alimentaria como el garbanzo (*Cicer arietinum*); lenteja (*Lens culinaris*) y arvejas (*Pisum sativum*), las cuales se caracterizan por poseer ciclos de vida cortos (3 meses) auto fertilidad, diploidía y un genoma pequeño y simple (Ejemplo: *L. japonicus* (n=6, 472,1 Mb); *M. truncatula* (n=8, ~500 Mb); *L. culinaris* (2n =14, 4.063 Mb)) (Arumuganathan y Earle, 1991; Sato et al., 2010; Wojciechowski, 2003). Otro clado de importancia es el phaseoloide o millettioide que reúne a un gran número de árboles, pero también especies anuales de importancia agrícola como el poroto (*Phaseolus vulgaris*), la soja (*Glicina max*) y el caupí (*Vigna unguiculata*). Estas especies son de climas cálidos y/o tropicales y se caracterizan por poseer 11 cromosomas (2n

= 2x = 22), a excepción de soja que tiene 20 cromosomas (Ren et al., 2019). Por otra parte el maní (*Arachis hypogaea*) está clasificado dentro del clado dalbergioide mientras que lupino (*Lupinus spp.*) en el clado genistoide (Gepts et al., 2005).

I.2.- Producción de legumbres de grano: lentejas y porotos

Las legumbres son cultivos anuales, sus granos representan una importante fuente de proteínas, los cuales son utilizados para la alimentación humana y animal. En algunas culturas su consumo se encuentra fuertemente arraigado a las tradiciones culinarias y a la dieta diaria (Olmedilla, et al. 2010).

Las legumbres de grano, por definición, se limitan a aquellas especies de las cuales se extraen sus granos secos, excluyendo a los cultivos de consumo fresco (arvejas, habas), cultivos oleaginosos (maní, soya) o praderas (trébol, alfalfa, vicias) (FAO, 2014). Durante el año 2019 se sembraron a nivel mundial, más de 89,1 millones de hectáreas de legumbres de grano. De este total, los cultivos de porotos y lentejas representan el 42,5% con 33,1 y 4,8 millones de hectáreas, respectivamente.

A nivel mundial el cultivo de la lenteja representa el 5,4% de las legumbres de granos cultivadas. El cultivo presentó un aumento explosivo desde 1961 al 2019 incrementando su superficie en un 298% (Fig. 1A). El año 2019 los 4,8 millones de hectáreas sembradas produjeron 5,7 millones de toneladas, con un rendimiento promedio de una tonelada por hectárea.

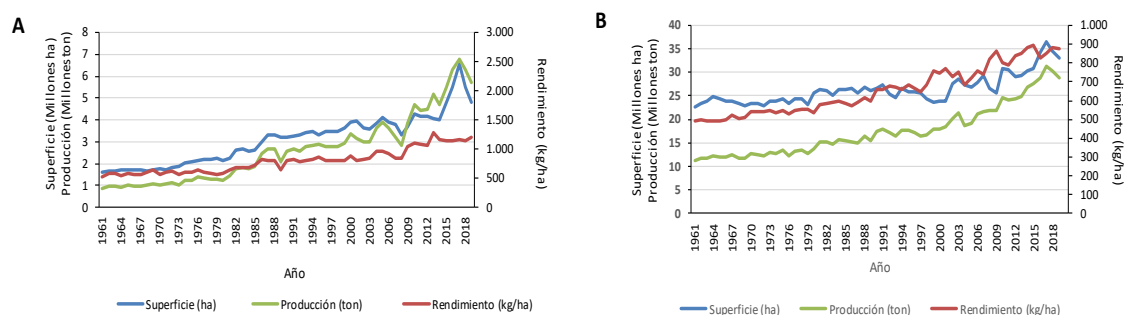


Figura 1. Evolución mundial de la superficie (ha), producción (ton) y rendimiento (kg ha⁻¹) del cultivo de: A) lenteja y B) poroto durante el periodo de 1961 al 2018 de la superficie (ha). Fuente: Elaboración propia con datos de FAO, División de Estadística (FAOSTAT).

A nivel mundial, la superficie sembrada de porotos durante el periodo 1961-2019 ha aumentado en un 45,2%, mientras que el rendimiento pasó de 493 a 874 kg ha⁻¹ (Fig. 1B). De la superficie sembrada de porotos el año 2019, se obtuvo una producción de 28,9 millones de toneladas, con un rendimiento promedio de 0,87 toneladas por hectárea. Los principales países productores son India, Brasil, Myanmar, China, Estados Unidos y México, concentrándose el 75% de la producción en Asia y América (Fig. 2).

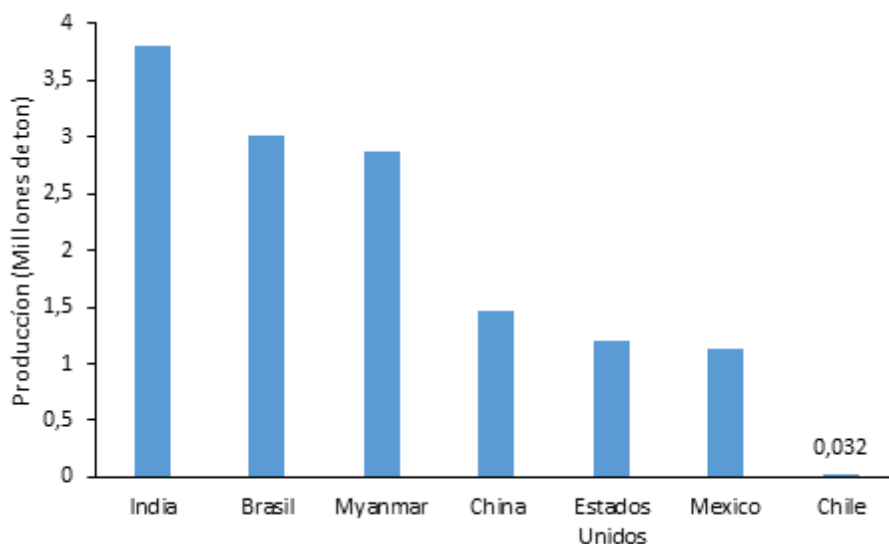


Figura 2. Promedio de producción de porotos de los principales países productores y Chile (32.309 ton) para el periodo 1994 - 2019. Fuente: Elaboración propia con datos de FAO, División de Estadística (FAOSTAT).

En relación con la producción de lentejas, el conjunto de países integrado por Canadá, India, Turquía, Australia y Estados Unidos concentraron el 72,8% de la superficie sembrada en 2019 (Fig. 3). De igual forma, Asia y América concentran el 85,4% de la producción mundial durante el periodo 1994 a 2019. A nivel latinoamericano, las superficies sembradas de lenteja son considerablemente menores, siendo Argentina el país con la mayor superficie sembrada para el 2018 (11.846 ha), con un rendimiento promedio de 13,7 qq ha⁻¹.

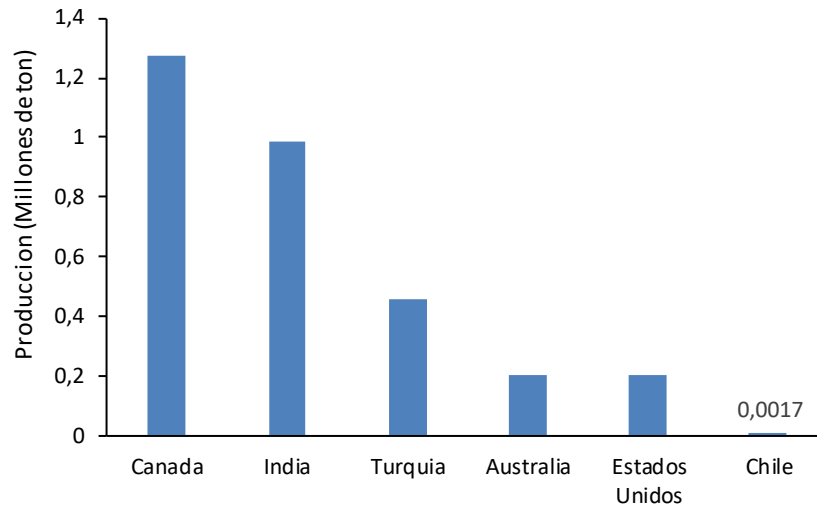


Figura 3. Promedio de producción de lenteja de los principales países productores y Chile (1.900 ton) para el periodo 1994 al 2019. Fuente: Elaboración propia con datos de FAO, División de Estadística (FAOSTAT).

La producción de lentejas de los países asiáticos se destina principalmente al autoconsumo. Durante el período comprendido entre 1993 y 2019, India y Turquía importaron en promedio más de 100.000 toneladas anuales, esto debido a que su consumo se encuentra fuertemente arraigada en su cultura (Cárdenas, et al., 2014). Al contrario, la producción de Canadá y Estados Unidos se destina, principalmente, a la exportación.

A partir de la década de 1980, Canadá aumentó sus zonas productivas de legumbres convirtiéndose en uno de los principales exportadores a nivel mundial, abasteciendo a más de 150 países. Además, para la lenteja, existe un incentivo público-privado al mejoramiento genético, que tiene por objetivo obtener variedades con resistencia a enfermedades y ciclos cortos de producción (90 días de siembra a cosecha) (González y Tay, 2017). Por otro lado, en Chile el programa de mejoramiento de lentejas de INIA liberó su última variedad, Calpún-INIA, el año 2003 (Tay y Tay, 2018).

I.3.- Contexto histórico de la producción de lentejas y porotos a nivel nacional

En 1980, la superficie sembrada con porotos, lentejas y garbanzos alcanzó las 184.220 ha, mientras que el año 2018 fue de 12.876 ha, es decir, un descenso del 93% en tres décadas (Fig. 4). La reducción de la superficie sembrada puede ser explicada por dos razones; 1) desplazamiento de las legumbres por cultivos más rentables como hortalizas y frutales; y 2) por la baja competitividad nacional frente a las importaciones. Debido a los puntos

mencionados, el cultivo de legumbres en Chile se realiza principalmente por pequeños agricultores y con la ayuda del núcleo familiar (Agricultura Familiar Campesina [AFC]).

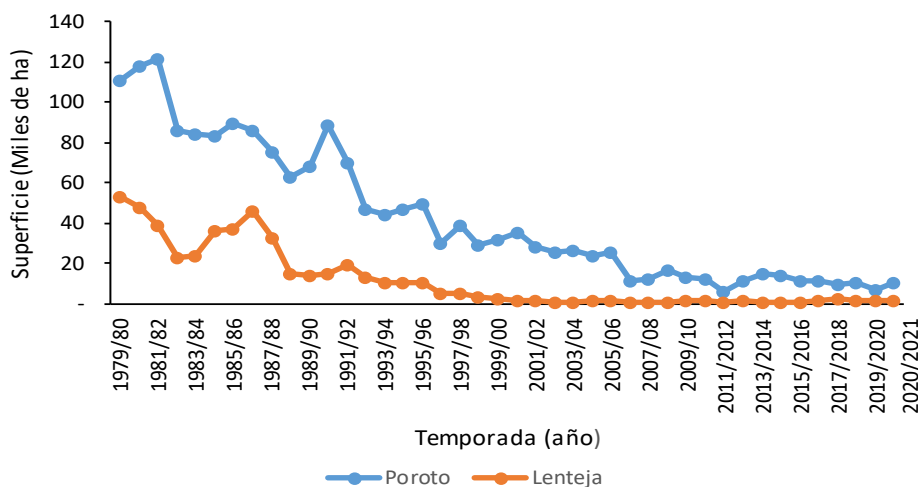


Figura 4. Evolución nacional de la superficie sembrada (ha) para el cultivo de lenteja y poroto durante el periodo de 1979 al 2021. Fuente: Elaboración propia con datos de ODEPA (2021).

Debido al aumento de las exportaciones de frutas, Chile se transformó en uno de los principales exportadores del hemisferio sur durante el fin de la década de los 70s y principios de los 80s (Cerón, 1986). A consecuencia de lo anterior, los campos chilenos experimentaron profundos cambios, los cultivos anuales fueron desplazados, entre ellos las leguminosas de grano. Al mismo tiempo que se incrementaron las exportaciones de fruta, las importaciones de granos aumentaron. Rápidamente, Chile dejó de ser un actor relevante en la producción de legumbres de grano, debido a la imposibilidad de competir con los bajos precios de las legumbres importadas (Kay, 1998; Ríos-Núñez, 2013).

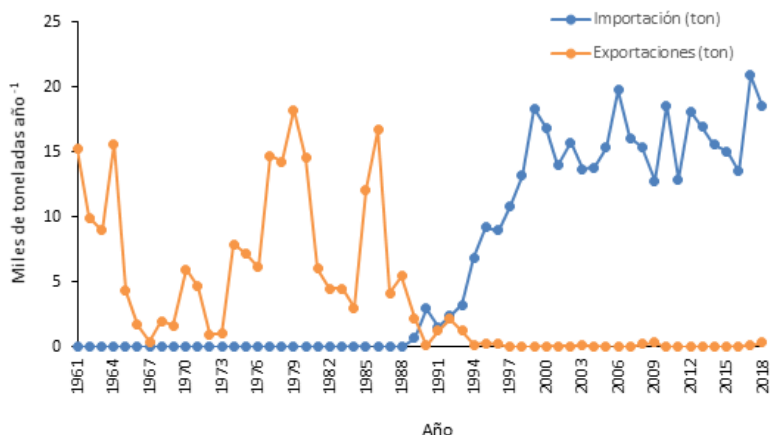


Figura 5. Evolución de las exportaciones e importaciones de lentejas a nivel nacional para el periodo de 1961 al 2019. Fuente: Elaboración propia con datos de ODEPA.

En la última década, la superficie sembrada con lenteja y poroto se ha estabilizado, rondando las 1.000 y 10.000 hectáreas respectivamente (ODEPA, 2018). La disminución de la superficie de lentejas, junto a bajos rendimientos, no permite el abastecimiento del mercado nacional, el diferencial es suplido por la importación de granos (Fig. 5). En el caso de las lentejas, parte importante proviene de Canadá, durante el 2019 se importaron de este país 14.725 toneladas de un total de 15.185. El rendimiento promedio nacional para el cultivo de lenteja fue de $\sim 8,1 \text{ qq ha}^{-1}$ el año 2019 (Fig. 6A). El rendimiento nacional es menor que el rendimiento promedio mundial. Por otra parte, el mayor rendimiento de lenteja lo obtuvo China con $23,1 \text{ qq ha}^{-1}$, mientras que en Egipto y Croacia fue de $\sim 20 \text{ qq ha}^{-1}$. En Canadá, el rendimiento promedio fue de 15 qq ha^{-1} y en Argentina, que posee el mejor rendimiento promedio en Latinoamérica fue de $14,2 \text{ qq ha}^{-1}$.

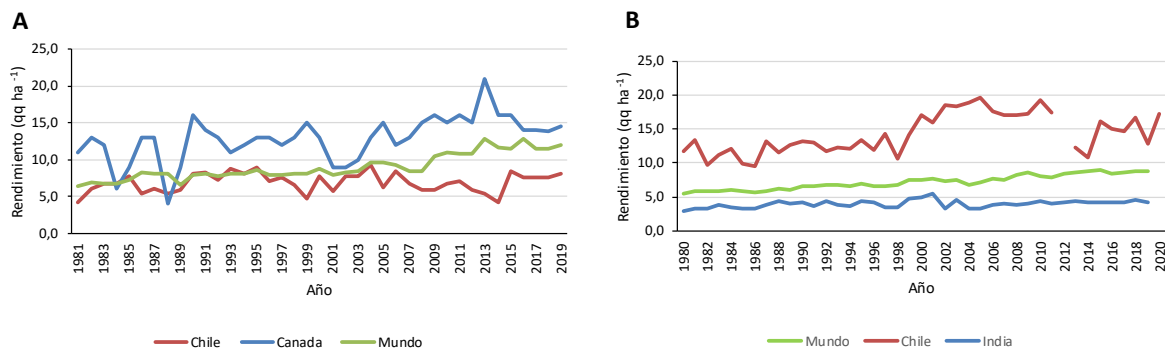


Figura 6. Evolución del rendimiento de A) lentejas y B) porotos (qq ha^{-1}) para el periodo de 1981 al 2019. Fuente: Elaboración propia con datos de ODEPA y FAO.

Los rendimientos de porotos en Chile superan al rendimiento promedio mundial y al de India, el país con mayor superficie sembrada (Fig. 6B). Para el año 2019 el rendimiento promedio nacional fue de 12,8 qq ha⁻¹, el más alto a nivel latinoamericano. Mientras que los rendimientos más altos registrados los poseen algunos países europeos: Irlanda (67,4 qq ha⁻¹); Bélgica (45,5 qq ha⁻¹) y; Polonia (27,7 qq ha⁻¹) en el año 2017. Sin embargo, al igual que en lenteja, la producción nacional no cubre la demanda, y se importan granos desde Argentina, Canadá, China y Estados Unidos.

El incremento en el rendimiento de los cultivos está asociado al manejo agronómico y al mejoramiento genético. En Chile el mejoramiento genético de leguminosas comenzó el año 1941, de la mano del Ministerio de Agricultura. En el año 1964, la responsabilidad fue tomada por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), el cual a la fecha ha puesto a disposición de los agricultores, 50 variedades de leguminosas, de las cuales 6 corresponden a lentejas y 22 a porotos de grano seco. La última variedad de lenteja lanzada fue Calpún-INIA en 2003 y de poroto fue Zorzal-INIA en 2017 (Tay y Tay, 2018) (anexo 1 y 2). Aunque la producción de las legumbres está limitada por diversos factores, la búsqueda de variedades mejoradas se ha centrado en la resistencia a enfermedades.

I.4.- Manejo agronómico de leguminosas de grano

La producción de un cultivo depende de aspectos genéticos, ambientales y de manejo agronómico. Desde el punto de vista genético, la selección del material vegetal (variedad) es la principal variable que se puede controlar. Por ejemplo, algunas variedades pueden tener resistencia a ciertas enfermedades, como el virus del mosaico del poroto (Bascur, 2017) o resistencia a hongos como la roya en lentejas (Peñaloza et al., 2007). También se puede seleccionar material vegetal que se adapte a ciclos productivos como de invierno o primavera lo cual responde principalmente a la cantidad y distribución de las precipitaciones y a las temperaturas. Por otra parte, aquellos aspectos que pueden ser modificados son inherentes al manejo agronómico. A este grupo pertenecen prácticas como: momento y tipo de labranza, siembra, fertilización, riego, control de plagas, enfermedades y malezas (Gregory et al., 2000; Lehmann et al., 2013). En esta sección se hará énfasis a algunos aspectos fitosanitarios

asociados al manejo de malezas y enfermedades, los requerimientos hídricos y nutricionales en leguminosas de grano.

I.4.1.- Fertilización

Desde el punto de vista ambiental y económico es fundamental realizar un uso eficiente de los fertilizantes, para ello es necesario comprender la dinámica de estos en el suelo, los requerimientos del cultivo y las cantidades apropiadas de aplicación de nutrientes, junto con considerar el momento óptimo de aplicación, así como la ubicación de los nutrientes en el suelo (Barber, 1979). Para las plantas existen 14 elementos esenciales, de los cuales 6 son macronutrientes (N, P, K, S, Mg, Ca) y 8 micronutrientes (Fe, Mn, B, Zn, Cu, Mo, Cl, Ni) (Marschner, 2012). La disponibilidad de nutrientes en la solución del suelo está determinada por el microambiente del suelo, así como por sus propiedades: el pH, potencial redox (Eh), materia orgánica, etc. (Wei et al., 2006).

Para realizar una fertilización racional de los cultivos se debe considerar al suelo como reservorio de nutrientes. Así, el uso de fertilizantes debe ser de acuerdo al análisis de suelo, el cual indica la cantidad de nutrientes disponibles para las plantas, como también las eventuales interacciones que afecten la dinámica de absorción de los nutrientes (Abbott y Murphy, 2004; Rodríguez, 2004).

En términos de requerimientos de fertilización, la lenteja y el poroto necesitan bajas cantidades de nutrientes para su desarrollo con relación a otros cultivos como el maíz, canola o trigo (Hirzel y Tay, 2011). Ambas especies poseen la capacidad de fijar nitrógeno (N₂) atmosférico, este proceso depende inicialmente del éxito de la nodulación (interacción planta bacteria), la cual a su vez se relaciona con la presencia del inóculo en el suelo, la alta especificidad planta-bacteria y la disponibilidad de N (Trigosa, 1970). Un alto contenido de N en el suelo disminuye la presencia de nódulos en las plantas, ya que este juega un papel represivo sobre la formación de nódulos (Palacios, 2017) y sobre el proceso de fijación de N₂ (Streeter, 1985). Experimentos han mostrado que una concentración de 55 mg de N por kg de suelo, puede inhibir el proceso de nodulación, aunque bajas concentraciones de N (6,5 mg N kg⁻¹ suelo) podrían estimularlo (Gibson y Nutman, 1960; Peoples, et al., 1995).

I.4.2.- Requerimiento hídrico

La disponibilidad de agua de riego es una de las principales limitantes para la producción agrícola (Daryanto et al., 2017). Adicionalmente, los efectos del cambio climático han provocado un incremento en la escasez de agua, por lo que se hace necesario un uso eficiente del recurso hídrico (Schewe et al., 2014). En Chile central, las precipitaciones se encuentran concentradas en cuatro meses (mayo a agosto), existiendo ocho meses secos en los cuales la demanda atmosférica supera la disponibilidad hídrica proveniente de las precipitaciones, por ello gran parte de los cultivos necesitan aplicaciones adicionales de agua, de modo de satisfacer la demanda hídrica del cultivo (Ferreya et al., 2001).

Los requerimientos de riego, independiente del cultivo, obedecen a dos procesos por los que el agua se escapa a la atmósfera: 1) la evaporación del agua de la superficie del suelo producto de la radiación incidente, y; 2) la transpiración de la planta (mecanismo de regulación térmica), el proceso en su conjunto se denomina evapotranspiración (ET) (Allen et al., 1994). Un ejemplo de cómo varía la participación de ambos procesos a través del crecimiento del cultivo es el siguiente; al momento de la siembra, casi el 100% de la ET se debe a la evaporación producto de la radiación, temperatura y viento, mientras que cuando el dosel alcanza su máxima cobertura, más del 90% de la ET ocurre como transpiración de la planta (Allen et al., 2006). La evapotranspiración (ETc) determina las necesidades reales del cultivo. Para su determinación se han establecido ciertos criterios, como la evapotranspiración de referencia (ETr), la que corresponde a la evapotranspiración de una cubierta vegetal bien regada y mantenida a una altura uniforme (generalmente una gramínea cespitosa) (Hargreaves, 1994). Las diferencias entre ETr y ETc son corregidas por el coeficiente de cultivo (Kc), el que varía de acuerdo al estado fenológico, al cambio de la porción de suelo cubierto por vegetación y la madurez de las plantas (Allen et al., 2005).

I.4.3.- Aspectos relacionados a enfermedades

En general, para controlar agentes causales de enfermedades en cultivos como lentejas y porotos, se realizan labores combinadas con pesticidas y prácticas agrícolas (Acuña, 2008; Latorre, 2004). Considerando lo anterior, una forma de cortar el ciclo de una enfermedad es mediante la rotación de cultivos, el cultivo sucesivo de una misma especie puede provocar la acumulación de poblaciones de patógenos específicos en el suelo, lo que deriva en una

disminución en el rendimiento y la calidad de los granos (Honeycutt et al., 1996; Peters et al., 2003). En el suelo, los agentes causales de las enfermedades pueden permanecer presentes en materiales vegetales en descomposición, y ser dispersados por acción de la lluvia y el viento (Latorre, 2018). Adicionalmente, los agentes patógenos pueden ser transmitidos por semillas, como la antracnosis (*Ascochyta* spp.), de ahí la importancia de contar con semillas certificadas o desinfectarlas (Tinivella et al., 2009; Tivoli y Banniza, 2007).

Por otra parte, para evitar el uso de productos químicos, los programas de mejoramiento de cultivos han desarrollado variedades tolerantes a las principales enfermedades. Por ejemplo, la variedad Calpún-INIA de lenteja tiene tolerancia a roya (*Uromyces fabae*) y en porotos, la variedad Zorzal-INIA es tolerante al virus del mosaico común del frejol (BCMV, por sus siglas en inglés). El uso de este material ha ayudado a disminuir la ocurrencia de estas enfermedades en el campo (Peñaloza et al., 2007; Tay et al., 2018).

I.4.4.- Malezas

La presencia de malezas ocasionan pérdidas del 34% del rendimiento en cultivos como leguminosas, tubérculos y cereales, superando a aquellas causadas por plagas y enfermedades (Oerke, 2006). Una de las estrategias más efectivas para el control de malezas es la correcta elección de los cultivos en la rotación (Zaccagnini et al., 2014). En ensayos de cultivos en rotación (cereal-leguminosa) se observó una disminución en la presencia de malezas en comparación a un monocultivo de cereal. En estos mismos ensayos se observó que los cultivos en rotación cereal-leguminosas disminuyeron las necesidades de fertilizantes para el cereal, incluso obteniendo rendimientos superiores que el monocultivo (Bogaard et al., 1999; Díaz-Ambroña y Mínguez, 2001). Adicionalmente, la rotación permite el uso de diferentes herbicidas con los que se puede aumentar el control de especies invasoras. Así, malezas de hoja ancha pueden ser controladas de forma selectiva en un cultivo de cereal, y viceversa, disminuyendo la población en el cultivo subsiguiente, y en consecuencia, los requerimientos de herbicidas (Loux et al., 2012; Poggio, 2005).

Otra forma de control es la eliminación de malezas durante la preparación del suelo. Por ejemplo, la realización de barbechos previos a la siembra, tanto químicos como mecánicos, han demostrado tener un efecto positivo en la disminución de la población inicial de malezas, ya que logran controlar la primera generación de plantas invasoras en la temporada,

disminuyendo también el banco de semillas presentes en el suelo para la temporada siguiente (Gallagher et al., 1999). Si bien, ambos métodos de barbecho disminuyen la incidencia de malezas, se debe considerar que bajo las condiciones de producción local, el suelo desnudo y eventos de lluvia, pueden favorecer procesos de erosión (Endlicher, 1988; N. Sepulveda, 2014).

Adicionalmente, se puede realizar control de malezas mediante la aplicación de herbicidas, los cuales son aplicados en diferentes momentos del desarrollo del cultivo. En el caso de herbicidas de ‘pre-emergencia’ estos tienen como objetivo reducir la presión de malezas en las fases tempranas del cultivo y favorecer su establecimiento (Labrada et al., 1996).

Los herbicidas, dependiendo de la dosis, pueden actuar de forma selectiva o total (Seefeldt, et al., 1995). En el caso particular de las leguminosas, el control de malezas de hoja angosta se logra con un herbicida selectivo para gramíneas. El control selectivo de estas malezas es relativamente fácil, utilizando por ejemplo: fluazifop-butil, que es un herbicida graminicida de acción sistémica que inhibe la producción de acetil Co-enzima A carboxilasa (ACCase) (Labrada et al., 1996). La mayoría de las plantas dicotiledóneas poseen dos tipos de ACCase, eucariota y procariota, la selectividad de los graminicidas radica en que las monocotiledóneas solo tienen el tipo de ACCase eucariota sensibles a este tipo de herbicidas (Konishi y Sasaki, 1994). En la misma línea, se han utilizado ingredientes activos como: quizalofop-etil, haloxifop-metil, sethoxydim, clethodim, para el control de malezas de hoja angosta y que no han mostrado efectos negativos en el cultivo del poroto (Ashton y Monaco, 1990; Espinoza et al., 1992; Faiguenbaum, 2003; Singh et al., 2014).

Cuando se trata de controlar especies dicotiledóneas (hoja ancha) en un cultivo que también es una especie dicotiledónea, la elección de herbicidas es restringida. Sólo para el cultivo de poroto se han desarrollado productos selectivos post emergentes.

En los últimos años, ha surgido debate respecto a los efectos negativos que producen algunos herbicidas como la trifluralina, debido a su efecto tóxico y prevalencia en el suelo y su traspaso a cuerpos de agua (Du et al., 2018). Se ha observado que aplicaciones de trifluralina tienen un efecto fitotóxico prolongado, afectando incluso el crecimiento del cultivo siguiente en la rotación (Chowdhury et al., 2020; Sikkema et al., 2008).

I.5.- Lentejas

I.5.1.- Origen y evolución

Por su parte, la lenteja tiene ancestros silvestres ampliamente distribuidos en la cuenca del Mediterráneo, Asia y África (Erskine et al., 2009). Se cree que la lenteja cultivada se originó en la región actual de Turquía y Chipre (Rashid et al., 2012). La lenteja se reproduce mediante la autopolinización, el cruzamiento natural es inferior al 1%, sin embargo, la lenteja cultivada se puede cruzar fácilmente con *Lens culinaris* ssp. *Orientalis*, por lo que se cree que esta última especie (*Lens culinaris* ssp. *orientalis*) es el progenitor de la lenteja cultivada (Ahmad et al., 1996). Se desconoce el origen evolutivo de la lenteja, pero existen especies del género *Lens* que han sido reportadas como ancestros de la lenteja que se produce en la actualidad. Ladizinsky en 1979 describió 4 especies: *L. culinaris*, *L. orientalis*, *L. nigricans* y *L. ervoides*; en 1984: se modificó a 2 especies, *L. culinaris* (con subespecie *orientalis* y *odemensis*) y *L. nigricans* (con ssp. *nigricans* y *ervoides*) (Ladizinsky et al., 1984); Ferguson et al., (2000), las clasificarían en 6 especies *L. culinaris* (ssp. *culinaris* y *orientalis*), *L. odemensis*, *L. tomentosus*, *L. nigricans*, *L. ervoides* y *L. lamottei*. Finalmente una de las últimas clasificaciones realizadas fue hecha por Muehlbauer y McPhee, (2005) bajo el principio de la capacidad de hibridación con la lenteja cultivada, estableciendo tres grupos genéticos, el primario es el que presenta mayor afinidad, constituido por: *L. culinaris* (con subespecie *culinaris*, *orientalis* y *odemensis*), el segundo pool de genes incluyen las especies *L. ervoides* y *L. nigricans* y el tercer grupo, el que presenta menor afinidad, está compuesto por *L. lamottei* y *L. tomentosus*. Esta última clasificación fue cuestionada por Wong et al., (2015) mediante análisis de genotipado por secuenciación (GBS) mostró que *L. culinaris*, *L. orientalis* y *L. tomentosus* pertenecen a primaria reserva genética, ya que pueden formar híbridos fértiles con lentejas cultivadas, *L. lamottei* y *L. odemensis* pertenecen a un grupo genético secundario, ya que es posible la fertilidad parcial a través del rescate de embriones, las especies *L. ervoides* y *L. nigricans* se clasifican en un grupo terciario y cuaternario respectivamente debido a que no pueden formar híbridos con lentejas cultivadas.

I.5.2.- Manejo agronómico del cultivo de la lenteja

I.5.2.1.- Fertilización

La lenteja a través del proceso de fijación de N_2 puede satisfacer hasta el 85% de la demanda de N (Faiguenbaum, 2003). El cultivo de la lenteja posee requerimientos nutricionales dependientes del rendimiento potencial. Por ejemplo, con un rendimiento alto de 30 qq ha^{-1} la demanda máxima de N, P y K es de 146, 22 y 71 kg ha^{-1} , respectivamente. Al contrario, con un rendimiento de tan solo 7 qq ha^{-1} , el cultivo demanda 34, 5 y 16 kg ha^{-1} de N, P y K, respectivamente (Erskine, et al., 2009).

Para suplir la demanda de nutrientes debemos considerar otros factores que afectan el crecimiento de las plantas como la medida de acidez o alcalinidad de los suelos (pH). Valores extremos, fuertemente ácidos o alcalinos, afectan la disponibilidad de los nutrientes, los que eventualmente pueden llegar a presentar toxicidad o deficiencia para las plantas (Marschner, 1991). La disminución del pH del suelo favorece la disponibilidad y absorción de algunos elementos como el Fe y Mn, provocando una eventual intoxicación, por ejemplo: en suelos ácidos, con un pH menor de 5,5 el Mn aumenta la proporción de Mn^{+2} , dicha forma es la más disponible para las plantas en comparación con las formas oxidadas, lo que le permite alcanzar concentraciones tóxicas para la planta (Guest et al., 2002).

Además, la disponibilidad de los nutrientes se ve afectada por las reacciones de oxido-reducción (redox) en el suelo, las que implican transferencia de protones y electrones (Sparks, 1995). El potencial redox (Eh) se ve condicionado por la presencia o ausencia de oxígeno, ya que este es el principal agente oxidante en el suelo, su presencia favorece los procesos de oxidación generando un Eh positivo que puede llegar a 450 o 500 milivolt (mV) lo que resulta desfavorable con riesgos de deficiencia de P, Mn, Fe. Al contrario, en condiciones de anegamiento el oxígeno es desplazado, generando un Eh bajo (<350 mV), lo cual beneficia procesos de reducción, aumentando la disponibilidad de nutrientes (Fe, Mn, S, Cu). El punto óptimo de Eh que favorece la disponibilidad de los nutrientes, y con ello el crecimiento de las plantas, se encuentra cerca de los 400 mV (Husson, 2013; Marschner, 2012). La mayoría de los suelos agrícolas tienen un rango de pH que va de 4 a 9, tanto el pH como el Eh tienen mucha variabilidad temporal y estacional que son inducidas por

condiciones climáticas, asociadas principalmente por los cambios en la humedad y temperatura del suelo (Brady y Weil, 2004; Yang et al., 2006).

1.5.2.2.-Requerimiento hídrico

El requerimiento hídrico de leguminosas de grano como lenteja y poroto, es menor que en cultivos de alta demanda como el maíz ($K_c=1,1$; 1,15 y 1,20 en estado de floración para lenteja, poroto y maíz, respectivamente) (Allen et al., 2006; Ojeda-Bustamante, et al., 2011). En general, el cultivo de lenteja posee un requerimiento hídrico menor que el del poroto. Por lo mismo, esto ha circunscrito la producción de poroto a zonas de riego, mientras que la producción de lenteja a zonas de secano.

En el caso particular de la lenteja, esta es cultivada en regiones de clima templado a semiárido, dependiendo exclusivamente de las precipitaciones, si bien en muchos lugares existe la posibilidad de establecer riego, la planta de lenteja es muy susceptible al anegamiento en cualquier momento durante su crecimiento (Erskine et al., 2009). Por otra parte, la aplicación de riego no repercute en un aumento del rendimiento. Por ejemplo, aplicaciones de 50 mm de agua de riego no aumentó el rendimiento en siembras tempranas en Nueva Zelanda (Mckenzie y Hill, 1990).

1.5.2.3.-Enfermedades

En el cultivo de la lenteja, los principales agentes causales de enfermedades de importancia económica son: Antracnosis (*Ascochyta* spp), roya (*Uromyces fabae*), moho gris (*Botrytis cinérea* y *Botrytis fabae*), mildiú (*Erysiphe pisi* y *Erysiphe polygoni*) y fusarium (*Fusarium oxysporum*) (Erskine et al., 2009; Espinoza et al., 1991)

La roya, causada por el hongo *Uromyces fabae*, puede afectar considerablemente el cultivo de la lenteja, pudiendo ocasionar pérdidas en la producción de granos de ~42% (Negussie y Pretorius, 2008). El ataque de este hongo se ve favorecido por la alta humedad y las temperaturas moderadas de entre 17 a 25 °C (Yavad et al., 2007). Estas condiciones ambientales generalmente ocurren durante la floración del cultivo (Saha et al., 2010). Para evitar un daño severo se recomienda realizar siembras tempranas, de modo de tener plantas vigorosas en el momento de mayor riesgo de la enfermedad, así también se recomienda establecer un programa de monitoreo con aplicaciones de agroquímicos para su control

(Espinoza et al., 1991). El uso de variedades resistentes o tolerantes es la forma más eficaz de prevenir esta enfermedad (Peñaloza et al., 2007).

1.5.2.4.-Malezas

La planta de lenteja se caracteriza por ser sensible a la competencia que ejercen las malezas (Sarker y Erskine, 2006). Lo anterior sumado a la baja disponibilidad de herbicidas selectivos genera la necesidad de evaluar otras alternativas para disminuir la incidencia de malezas, por ejemplo: modificar el espaciamiento entre hileras. Al disminuir la distancia entre hileras, las plantas cubren el espacio más rápidamente, impidiendo el paso de luz para el crecimiento de malezas (Guglielmetti et al., 1977). En lenteja sembrada mecánicamente, la dosis de semilla recomendada es de 72 a 82 kilos de semilla ha^{-1} (espacio entre hileras de 30 a 35 cm), lo cual resulta en 70 a 80 plantas m^{-2} (Espinoza et al., 1991). Así, siembras con alta densidad (200 plantas m^{-2}) comparadas con una densidad normal (80 plantas m^{-2}), favorecen la dominancia del cultivo frente a las malezas, afectando solo en un 10% el rendimiento, pero con un mayor retorno económico (McDonald et al., 2007). El método más eficaz para el control de malezas es el manual, pero esta técnica es cara e impracticable a gran escala. En este sentido, un cultivo de lentejas sin control de malezas puede afectar el rendimiento en hasta un 60% comparado con un deshierbe manual (Kayán y Adak, 2006; Sandhu et al., 1991).

Al contrario, en el caso del cultivo de lenteja, no hay productos selectivos para malezas dicotiledóneas, pero se han reportado algunas variedades de lentejas con resistencia a algunas moléculas, por ejemplo a: metribuzina (Friesen y Wall, 1986), e; imidazolinona (Chant, 2004). Por ejemplo, la variedad de lenteja Maxim CDC Clearfield® posee un gen de resistencia al herbicida imidazolinona, el cual es usado en forma extensiva en el manejo de malezas de hojas anchas por los agricultores en Canadá (Kumar et al., 2016). Chile no cuenta con variedades de lentejas resistentes a herbicidas selectivos de hoja ancha, por lo que la eliminación de este tipo de malezas se realiza de forma mecánica o de manera preventiva con la aplicación de herbicidas de pre emergencia (Tay et al., 2000).

I.5.3.- Caracterización de la zona en estudio, Chanco

Pertenece al seco costero de la Región del Maule, su ubicación cercana al océano Pacífico define el clima de la zona, que corresponde a un clima cálido templado, con régimen húmedo subhúmedo seco (Csb2Shs) (Kottek et al., 2006). Las temperaturas medias anuales rondan los 13,3 °C, siendo enero el mes más cálido con temperaturas de 24,4 °C en promedio. Existen 339 días consecutivos libres de heladas, presentando una acumulación de horas frío ($T < 7,2$ °C) de 519. Las precipitaciones durante el periodo 1981 a 2001 promediaron los 860 mm anuales, y la distribución de las lluvias se concentra entre los meses de mayo a agosto (Fig. 7). No obstante, las precipitaciones se encuentran presentes durante todos los meses del año en una menor o mayor proporción (Fig. 7A). La evapotranspiración potencial anual es de 1.271 mm. Si bien el promedio histórico es de 860 mm anuales, actualmente estas cifras han sufrido una disminución. Desde el 2002 al 2019 se observa una clara tendencia a la disminución de las precipitaciones la que en promedio fue de 771 mm. Durante el año 2019 la cantidad de agua caída fue de 536 mm, lo que arrojó un déficit del 37,6% en relación a las precipitaciones históricas (Del Pozo y Canto, 1999; Santibáñez, 2017).

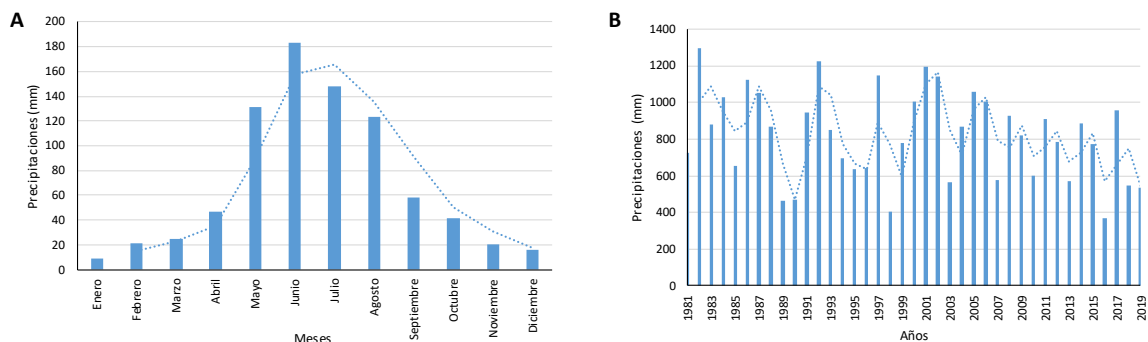


Figura 7. Precipitaciones históricas (1989-2019) para la comuna de Chanco, Región del Maule. A) Promedio de precipitaciones mensuales; y B) Precipitaciones anuales totales. FUENTE: Reserva Nacional Federico Albert, CONAF.

Los suelos pertenecientes al seco costero de la región del Maule, se caracterizan por poseer su origen a partir de materiales sedimentarios, profundos, de texturas medias en la superficie y pesadas en profundidad. La profundidad efectiva de estos suelos fluctúa entre 70 y 100 cm. Ocupa una posición de terrazas marinas con topografía ondulada, moderadamente erosionados, en algunos casos con pendientes mayores al 20% (CIREN-CORFO, 1996).

1.5.4.- Principal limitante productiva identificada en el cultivo de la lenteja; Chanco

El cultivo de la lenteja es principalmente limitado por la presencia de plagas y malezas, los problemas asociados a plagas son frecuentes, pero no representa mayores complicaciones, debido a que existen estrategias de control, al contrario, el control de malezas es menos eficiente. En Chile Algunas plagas o enfermedades importantes son Cuncunilla (*Epinotia aporema*), Roya (*Uromyces fabae*), el desorden nutricional denominado Marea negra o Sereno (toxicidad por manganeso y hierro) y la presencia de malezas (González y Tay, 2017). Algunas de las malezas dicotiledóneas importantes en el cultivo de la lenteja son rábano (*Raphanus raphanistrum* L.), correhuela (*Convolvulus arvensis*), mostacilla (*Sisymbrium officinale* L.) y romaza (*Rumex crispus* L.), también destacan algunas gramíneas tales como avenilla (*Avena fatua*), ballica (*Lolium multiflorum*) estas últimas especies de fácil control con herbicidas selectivos a diferencia de las malezas dicotiledóneas (Espinoza et al., 1991).

A nivel mundial el principal estrés abiótico que afecta el cultivo de la lenteja es la sequía (Yadav et al., 2007). En la zona de estudio frecuentemente las plantas de lentejas crecen en condiciones de secano, dependiendo de las precipitaciones para completar el ciclo (Jackson, 1989). En contraparte los problemas de deficiencias nutricionales si pueden ser corregidos más fácilmente, el P es uno de los nutrientes más críticos para el crecimiento óptimo del cultivo, bajos niveles de P disponible en el suelo afectan los procesos de nodulación para la fijación del N₂ (Singh y Singh, 2016). La aplicación de 50 kg P₂O₅ junto con 30 kg N ha⁻¹ resultó en un mayor rendimiento de grano, por si sola la aplicación del P incrementó el rendimiento de grano en un 18,56% en relación al control que produjo 12,2 qq ha⁻¹ (Kanez et al., 2013). A nivel nacional la fertilización fosfatada en el cultivo de la lenteja es poco común, siendo la fertilización nitrogenada más frecuente (González y Tay, 2017). La falta de una fertilización que satisfaga la demanda del cultivo, sumado a otras dificultades como el deficiente manejo de malezas, ha generado una brecha entre el rendimiento potencial y el rendimiento medio de los agricultores.

1.5.4.1.-Desordenes nutricionales en lentejas

No todas las enfermedades en las plantas son causadas por agentes biológicos, hay también desórdenes minerales que pueden desencadenar una alteración fisiológica que resulta en la disminución del rendimiento (Marschner, 2012). En el caso del cultivo de lenteja, en el país

se ha reportado un desorden nutricional provocado por la acumulación excesiva de hierro (Fe) y manganeso (Mn), el cual es confundido con el ataque de agentes patógenos. El desorden es conocido como “marea negra”, se produce por la absorción hasta niveles tóxicos de estos metales, reduciendo el crecimiento de las plantas (Ciudad y Ite, 1994; Sepúlveda y Baherle, 1986). La toxicidad por Mn varía entre especies y variedades, lo que hace aún más complejo su diagnóstico en base a la concentración (El-Jaoual y Cox, 1998).

En el caso particular del síndrome de marea negra, tanto el pH como el Eh juegan un rol crucial sobre la disponibilidad de Fe y Mn. En condiciones de pH y Eh bajos, estos elementos se reducen, aumentando su solubilidad en la solución del suelo, provocando problemas de toxicidad, al contrario, un pH y Eh altos disminuyen drásticamente la disponibilidad de estos nutrientes (Moraghan y Mascagni, 1991; Vorm y Van, 1979). Adicionalmente, uno de los factores que favorece la aparición de este síndrome en legumbres es la fijación de N₂, la cual induce la acidificación del suelo contribuyendo al aumento del Mn y Fe soluble en el suelo (Bromfield et al., 1983).

Una alternativa para reducir el riesgo de toxicidad es mediante la corrección del pH del suelo. Esta práctica se debe realizar previo a la siembra mediante la aplicación de cal, dicha aplicación busca aumentar el pH del suelo y con ello reducir la solubilidad del Mn (Altland et al., 2008; Alvarez et al., 2010). Adicionalmente, se debe favorecer el rápido crecimiento de la planta mediante la aplicación de una fertilización balanceada, lo cual reduce las posibilidades de un aumento de la concentración del metal en los tejidos de la planta (Fageria, 2001; Hue et al., 2001), por ejemplo, mediante la aplicación de fertilizantes nitrogenados.

I.6.- Porotos

I.6.1. Origen y evolución

El poroto (*Phaseolus vulgaris* L.) tiene dos centros de origen, ambos en América: germoplasma Mesoamericano y Andino (Voysesst, 2000). Es una especie anual, que alcanza su madurez entre 75 y 270 días (precoces y tardías, respectivamente), sus tallos pueden presentarse erectos, semipostrados o postrados, las ramas pueden presentar dos tipos de crecimiento, determinado o indeterminado, dependiendo si su meristema terminal de crecimiento es reproductivo o vegetativo (Singh y Voysesst, 1997). El Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) a determinado cuatro tipos principales de crecimiento:

determinado arbustivo (Tipo I); indeterminado arbustivo (Tipo II); indeterminado postrado (Tipo III) e indeterminado trepador (Tipo IV) (Debouck et al. 1985). Lo anterior es una de las principales distinciones desde el punto de vista agronómico (Faiguenbaum, 2003). Morfológicamente, las hojas están compuestas por tres foliolos, dos laterales y uno terminal, de textura lisa a reticulada, las flores se disponen en inflorescencias axilares o terminales dependiendo del hábito de crecimiento y son de color variable (rojas, lilas, blancas), dando lugar a vainas de 60 a 22 centímetros. Cada planta puede producir 30 o más vainas, cada una con un número variable de granos. Estos últimos pueden ser de diferentes formas, tamaños y colores, pudiendo encontrar semillas blancas, cremas, amarillas, pardas, rosadas, rojas, moradas, negras y una variación de colores (Mateo-Box, 2005).

Cada centro de origen del poroto posee tres razas, las cuales poseen entre sí características comunes (Singh et al., 1988). Un grupo de razas proviene del acervo Americano o Mesoamericano: Durango, Jalisco y Mesoamérica, mientras que el acervo Andino está constituido por las razas Nueva Granada, Chile y Perú (Voyses, 2000). Las principales diferencias entre las razas centro americanas y andinos radican en el tamaño de los granos; el primer grupo posee granos pequeños y redondeados (25-40 g/100 semilla), mientras que el segundo posee granos de mayor tamaño y arriñonados (>40 g/100 semilla) (Singh et al., 2013; Singh et al., 1991). Adicionalmente, existen diferencias en la morfología de la planta, adaptación agroecológica y en los patrones de faseolina, proteína de almacenamiento en la semillas (Díaz y Blair, 2006; Singh et al., 2013).

I.6.2.-Manejo agronómico del cultivo del poroto

I.6.2.1.- Fertilización

La recomendación de fertilización depende del nivel de extracción de nutrientes del cultivo, el cual obedece al rendimiento esperado, es decir, a la demanda o extracción. En este sentido, las necesidades del cultivo del poroto inicialmente son mínimas (Fig. 8), pero aumentan con el desarrollo de la planta, acentuándose en prefloración, llegando a ser máximas en el llenado de grano (Ortega, et al., 2015).

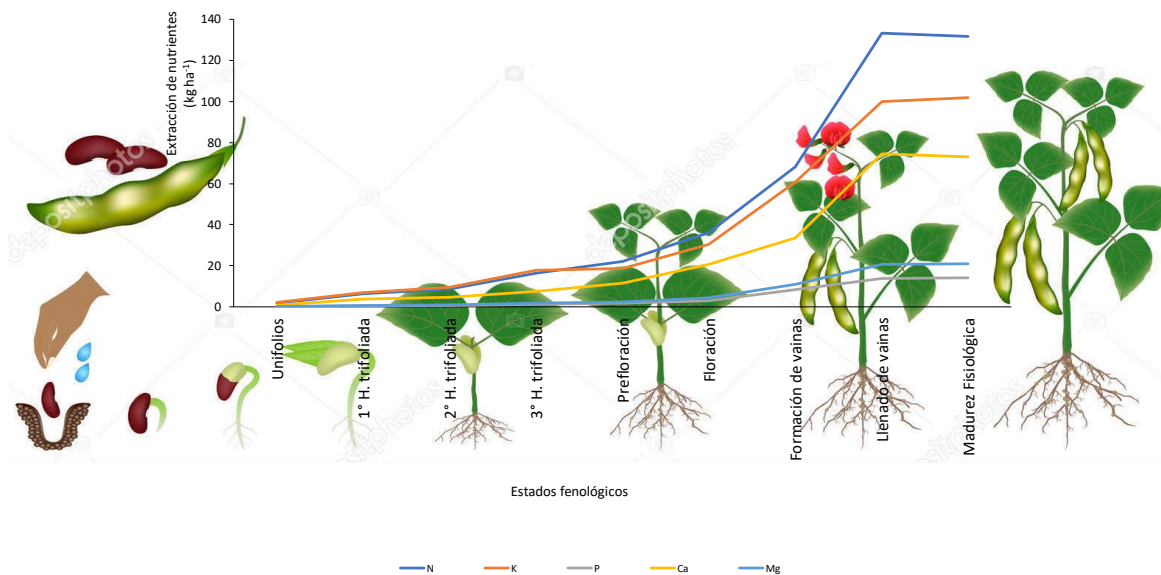


Figura 8. Absorción nutrimental de plantas de poroto (*Phaseolus vulgaris* L.) con riego y rendimiento de 2400 kg ha⁻¹. Nitrógeno (N), Potasio (K), fósforo (P), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y MS Fuente: Ortega, et al., 2015.

Adicionalmente, Mateo-Box (2005) señala que el cultivo del poroto, bajo condiciones de riego y con un rendimiento potencial de 2200 kg ha⁻¹, requiere 103, 31 y 87 kg ha⁻¹ de N, P y K respectivamente.

1.6.2.2.-Requerimiento hídrico

El cultivo del poroto es muy sensible al estrés hídrico. Amede y Schubert (2003), reportaron que después de una semana de sequía moderada, la variedad de poroto Brilliant redujo su tasa de fotosíntesis en un 75%, afectando en un 25% la producción de materia seca. En otro experimento de déficit hídrico (0,75 bar) previo a la floración en porotos, se redujo la producción de vainas en un 25%, afectando significativamente el rendimiento final de granos (Stansell y Smittle, 1980).

Aun siendo crítica la disponibilidad de agua en zonas mediterráneas, los agricultores aplican hasta un 49% más de agua por sobre el requerimiento de los cultivos (Hamdy y Katerji, 2006). Por ello, la mejora en la eficiencia del uso del agua (EUA o WUE en inglés) es esencial, y uno de los caminos para lograrlo es mejorar de eficiencia del riego (Daryanto et al., 2017; Turner, 1990; Wakrim et al., 2005). Un riego eficiente proporciona el agua necesaria para el desarrollo de las plantas sin afectar el rendimiento final (Smith et al., 2002).

1.6.2.3.-Enfermedades y plagas

Existe un diverso número de plagas que pueden afectar el cultivo del poroto, entre los que encontramos al gusano cortador (*Agrotis ipsilon*), pulgones (*Myzus persicae*, *Aphis gossypi*, *Macrosiphum euphorbiae*), polilla del poroto (*Epinotia aporema*) y Bruco (*Aconthoscelides obtectus*) entre otros de menor importancia (Faiguenbaum, 2003). Todos los anteriores pueden ser controlados mediante aplicaciones preventivas o mediante monitoreo. De los insectos mencionados el pulgon es uno de los más importantes debido a la capacidad que tienen de transmitir virus (Oviedo et al., 2010). El cultivo del poroto en Chile puede ser afectado por diferentes agentes virulentos como el virus del mosaico común del frejol (BCMV), virus del mosaico amarillo del frejol (BYMV), virus del mosaico del pepino (CMV), virus del mosaico de la alfalfa (AMV) y el virus necrótico del mosaico común del frejol (BCMNV) (Sepúlveda, 2016). Estos se encuentran distribuidos ampliamente en las zonas de producción del poroto desde Coquimbo al Biobío, afectando fuertemente los rendimientos, provocando pérdidas que fluctúan entre el 50% a un 80% dependiendo de la severidad de la infección (Bascur, 2017; Madariaga, 2017). El BCMV es el de mayor importancia en Chile debido a la severidad con la que se presenta en los cultivos, de este virus se han determinado tres razas presentes, Tipo, NY15 y Necrótica, las que se caracterizan por provocar un mosaico que presenta áreas verde oscuras entremezcladas con áreas verde claras, ampollamiento, enanismo, y la raza necrótica puede provocar síntomas de necrosis apical y muerte de plantas (Faiguenbaum, 2003; Sepúlveda, 2000). Una de las principales características del BCMV, es que posee otra alternativa de transición a la mecánica por medio del ataque de áfidos, ya que es capaz de transmitirse verticalmente por medio de las semillas afectando a la futura generación (Singh y Schwartz, 2010).

La resistencia a las cepas del BCMV han sido estudiadas ampliamente a través del tiempo debido al descubrimiento de los genes bc, éste grupo de virus (BCMV) representan una de las principales causales de virosis a nivel mundial afectando drásticamente el cultivo del poroto (Meziadi, et al., 2017). Una alternativa efectiva para mitigar el efecto del virus es el constante desarrollo de variedad resistentes al complejo de virus. La variedad Zorzal-INIA, es una variedad resistente al virus del mosaico común del frejol (BCMV) aunque susceptible al virus del mosaico común necrótico del poroto (BCMNV), frente a éste ultimo la planta

reacciona con el síntoma de la “raíz negra” provocando la muerte de la planta, evitando la propagación del virus (Tay y Tay, 2018, INIA, 2018).

1.6.2.4.- Malezas

Algunos ingredientes activos comúnmente usados en lentejas y porotos para el control de especies de hoja ancha son: pendimetalina, linurón y trifluralina, los que se caracterizan por ejercer su control una vez iniciada la germinación de las malezas (Avola et al., 2008; Loux et al., 2012; Soltani et al., 2011; Yadav et al., 2007). Tanto la pendimetalina como la trifluralina pertenecen al grupo químico de las dinitroanilinas, las que se caracterizan por inhibir el crecimiento y la elongación de las raíces, debido a que afectan la producción de la tubulina en la mitosis, interrumpiendo la división celular (Labrada et al., 1996). Es importante mencionar, que los herbicidas de hoja ancha pueden generar un daño al propio cultivo, debido a la baja selectividad de los ingredientes presentes en estos productos. Los resultados de las aplicaciones de los herbicidas de pre-emergencia dependen de las condiciones ambientales, dosis aplicadas, así como de la textura y contenido de materia orgánica del suelo, este último actúa como un adsorbente (Chiou, 1990). Con relación a la dosis aplicada, se ha visto que una sobredosis puede afectar negativamente el rendimiento. Así, en un ensayo de poroto con aplicaciones de linurón con una dosis del doble a la recomendada (2250 g ha^{-1}), se observó una disminución del 16% del rendimiento respecto al control con la dosis comercial (Sikkema et al., 2008). Otro aspecto importante a considerar es el efecto residual de estos productos.

Cuando se trata de controlar especies dicotiledóneas (hoja ancha) en un cultivo que también es una especie dicotiledónea, la elección de herbicidas es restringida. Sólo para el cultivo de poroto se han desarrollado productos selectivos post emergentes, benzotiadiazol y fomezafen los cuales controlan una amplia gama de malezas de importancia para el cultivo, como: Quinguilla (*Chenopodium álbum*); Chamico (*Datura stramonium*); Verdolaga (*Portulaca oleracea*); Rábano (*Raphanus raphanistrum*), entre otras (Bailey et al., 2003; Soltani et al., 2006). La efectividad de la aplicación es mayor en estadios tempranos del desarrollo de las malezas, cuando están creciendo activamente y sin estrés (Ashton y Monaco, 1990).

Al igual que la mayoría de los cultivos anuales, en poroto también se ha estudiado el efecto de la densidad de siembra sobre el control de malezas (Soloneski y Larramendy, 2013;

Woolley et al., 1993). Al disminuir la distancia entre hileras se favorece un cierre rápido del dosel y aumenta la presión competitiva del cultivo sobre las malezas. Por ejemplo, en el cultivo del poroto, espaciamientos entre hileras de 15 y 36 cm, lograron suprimir el crecimiento de malezas en un 82% en comparación con un espaciamiento de 91 cm (Teasdale y Frank, 1983). En Chile el cultivo del poroto (tipo tórtola) se siembra a dosis de 120 kg de semillas ha⁻¹ con una distancia entre hileras de 75 cm, con lo cual se logra una población de 180.000 plantas ha⁻¹. Lo anterior indica que esta densidad puede favorecer la aparición de malezas.

I.6.3.- Caracterización de la zona en estudio, Curepto

Curepto pertenece al secano interior, ubicación próxima al río Mataquito. El clima de la localidad está fuertemente influenciado por su cercanía al afluente. El clima predominante es cálido templado con un régimen húmedo a semiárido (Csb2Sa) (Kottek et al., 2006), la temperatura media anual es de 13,8 °C, siendo el mes más cálido el de enero con 26,7 °C en promedio. Las precipitaciones históricas son cercanas a los 773 mm, con 339 días libres de heladas, con una acumulación de 704 horas frío ($T < 7,2^{\circ}\text{C}$) y una evapotranspiración potencial anual de 1.325 mm (Del Pozo y Canto, 1999; Santibáñez, 2017). Según los datos históricos de la estación meteorológica “Río Mataquito en Licantén”, próxima a los principales sectores productores de legumbres, el promedio anual para el periodo 2002-2019 fue de 639 mm anuales, lo que representa un déficit de 18% con relación al promedio histórico. Al igual que en la zona costera, las precipitaciones se ven concentradas a finales de otoño y mediados del invierno, en tanto que las precipitaciones en verano se presentan de forma escasa a nula (Fig. 9).

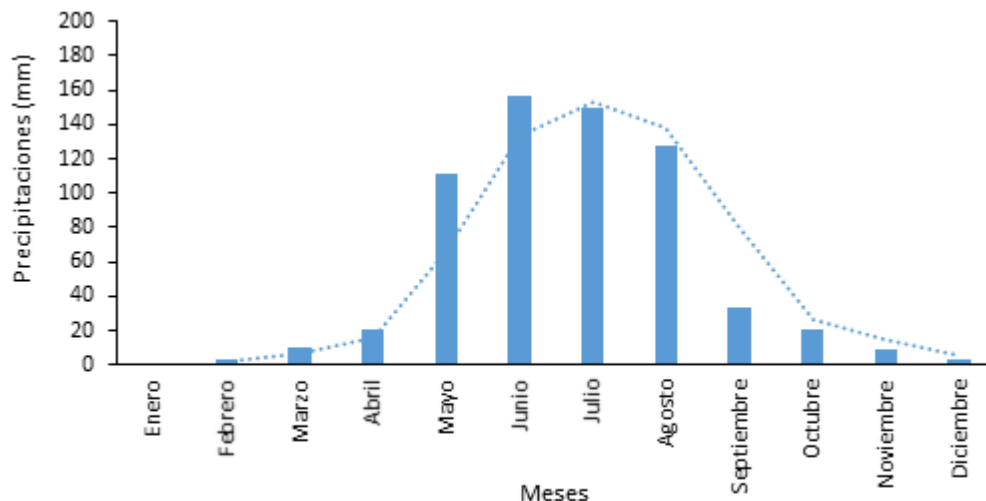


Figura 9. Promedio de precipitaciones mensuales (2001-2019), en la comuna de Curepto región del Maule. FUENTE: Dirección general de aguas (DGA), Estación Río Mataquito en Licantén.

Los suelos de la cuenca del río Mataquito presentan perfiles poco desarrollados, en posición de terrazas aluviales, encontrándose suelos sedimentarios delgados a profundos, de texturas moderadamente gruesas, permeabilidad moderada, drenaje imperfecto sometido a inundaciones ocasionales, con diversos grados de pedregosidad tanto en la superficie como en profundidad (CIREN-CORFO, 1983).

I.6.4.- Principales limitantes productiva identificadas en el cultivo del poroto; Curepto

El poroto como todos los cultivos, se ve enfrentado a diversos estreses bióticos y abióticos; las limitaciones bióticas importantes que limitan la producción de granos son la antracnosis, virosis producto de la infección del virus del mosaico común, y por su parte las limitantes abióticas comprenden la sequía, choques térmicos ($>30^{\circ}\text{C}$) y las deficiencias nutricionales (Singh, 1999).

Comparativamente a nivel de fijación de N, el poroto es una planta con baja eficiencia en relación a otras leguminosas de grano (Graham, 1981). Por ello la fertilización con N es ampliamente utilizada en el cultivo del poroto a nivel mundial, lo que afecta tanto los costos de producción como al medio ambiente (de Sousa, et al., 2020) .

Las deficiencias nutricionales específicamente N y P han resultado en una disminución del rendimiento de granos, las deficiencias de P además de limitar el proceso de fotosíntesis, restringen la fijación biológica del N₂, afectando tanto el proceso infeccioso como el crecimiento de los nódulos (Valentine et al., 2018). En el secano costero del valle del Mataquito, los agricultores realizan fertilización fosfatada en un 67% de los casos, superando a la fertilización nitrogenada que llega al 57% (González y Tay, 2017).

En Chile, INIA se ha encargado de realizar las recomendaciones en cuanto a la fertilización del cultivo del poroto existiendo diversas recomendaciones de fertilización N a lo largo del tiempo, 70 a 120 Kg N ha⁻¹ (Guglielmetti et al., 1977); 40 Kg N ha⁻¹ (Fernández, 1983); 46 Kg N ha⁻¹ (Tay et al., 2000). Las recomendaciones de fertilización N más actuales dicen que con una dosis de 60 a 120 Kg N ha⁻¹ se puede obtener el mayor rendimiento (Rodríguez, 2004). Así también Faiguenbaum (2003) y Hirzel (2011) recomiendan la aplicación de 90 y hasta 80 Kg N ha⁻¹, respectivamente, este último también hace distinción en las dosis dependiendo de la textura del suelo, y la parcialización de las dosis realizando aplicaciones en momentos críticos como el establecimiento del cultivo e inicio de floración. Todas las recomendaciones independientes de la cantidad a aplicar sugieren contar con un análisis de suelo para realizar una fertilización racional. Si bien existe información de sugerencias de fertilización, las recomendaciones además de realizarse a nivel macro (Chile) no distinguen los requerimientos específicos para cada variedad o zona productiva y rendimiento potencial.

I.6.4.1. Brote severo de Fusarium en poroto

En el cultivo del poroto, las principales enfermedades que afectan su desarrollo son: Antracnosis (*Ascochyta* spp.), Roya (*Uromyces phaseoli*), Esclerotinosis (*Sclerotinia sclerotiorum*), marchitamiento por Fusarium (*Fusarium spp*) y la virosis que causa el mosaico común (Latorre, 2004, 2018). Las dos últimas enfermedades pueden ocasionar pérdidas de entre 80 a 95% del rendimiento, ya que afectan al cultivo en los diferentes estados fenológicos de la planta (Schwartz y Gálvez, 1980). Varios estudios han reportado una mayor incidencia de las amarilleces o marchitamiento por *Fusarium oxysporum* en poroto (Buruchara et al., 1999; Leitao et al., 2020). La fusariosis es una de las enfermedades fungosas más importantes para el cultivo del poroto en Chile. Los síntomas de amarilleces o marchitamiento por Fusarium suelen presentarse en la emergencia de las plantas producto

del daño en el tejido vascular (necrosis vascular) del sistema radical y del cuello de las plantas, generando menor vigor y desarrollo. En casos severos, puede existir necrosis en todo el tejido vascular (Faiguenbaum, 2003; Edel-Hermann y Lecomte, 2019). Fusarium, al ser un hongo presente en el suelo, entra por las heridas producidas en el sistema radical o en el cuello de la planta (Edel-Hermann y Lecomte, 2019; Latorre, 2018). Para combatir esta enfermedad, la mejor alternativa es la desinfección de semillas, ya que una vez establecido el cultivo, los tratamientos químicos no son efectivos (Abawi, 1994).

I.7.- Consideraciones

Las lentejas y los porotos son uno de los cultivos de leguminosas más importantes de la región y el país, sin embargo, ambos cultivos poseen brechas de manejo importantes. El estudio de soluciones para estas limitaciones a nivel local puede generar un impacto positivo aumentando la productividad, el retorno económico y calidad de vida de los agricultores. El enfoque de esta tesis fue evaluar en campo la introducción de mejoras en el manejo agronómico en el cultivo de lentejas y porotos enfocado en la evaluación de las principales limitantes productivas para cada especie.

I.8.- Hipótesis general de trabajo

La introducción de pequeños cambios en las prácticas de manejo convencional en cultivos de bajo nivel tecnológico como lenteja, y en cultivos con mayor nivel tecnológico como el poroto, puede aumentar el rendimiento de estos cultivos en el secano de la región del Maule.

I.9.- Objetivo general

Evaluar las principales limitantes productivas y proponer algunas estrategias correctivas que permitan aumentar el rendimiento para los cultivos de lenteja en la comuna de Chanco y de poroto en la comuna de Curepto.

I.9.1.- Objetivos específicos

- 1) Evaluar la respuesta a la fertilización nitrogenada en 4 variedades de lentejas y su efecto sobre el rendimiento y la composición mineral de los granos.
- 2) Evaluar bajo condiciones controladas la toxicidad producida por exceso de Fe y Mn en lentejas.
- 3) Evaluar la respuesta a la fertilización nitrogenada de 4 variedades de porotos bajo dos estrategias de riego y su efecto sobre el rendimiento y la composición mineral de los granos.
- 4) Evaluar bajo condiciones controladas en cultivares de poroto la incidencia de la enfermedad causante de la marchitez del cuello.

Cada objetivo específico será abordado por separado y presentado en formato de artículo científico, incluyendo su respectivo marco teórico, metodología, resultados, discusión y conclusiones.

CAPITULO I

Respuesta de lenteja (*Lens culinaris* M.) a diferentes fuentes de fertilización nitrogenada en el secano costero de la Región del Maule, Chile.

Resumen

Los rendimientos de lenteja en Chile son de 0,29 ton ha⁻¹, más bajos que el promedio mundial de 1,1 ton ha, sin embargo, se pueden llegar a rendimientos más altos. El objetivo principal de este trabajo fue estudiar la respuesta del cultivo de la lenteja a diferentes fuentes de fertilización nitrogenada, así como también evaluar sus efectos sobre aspectos morfológicos y nutricionales en cuatro genotipos de lentejas los cuales fueron evaluados en la comuna de Chanco, región del Maule, Chile. Para ello, se probaron, fuentes de fertilización nitrogenada como genotipos, estos últimos corresponden tanto a variedades mejoradas como a ecotipos de producción. En general, este estudio logró rendimientos de grano de hasta 2,71 toneladas de granos ha⁻¹, destacando el ecotipo de Vega, cuyo potencial genético se ve favorecido bajo las condiciones de producción del secano costero. La fertilización N de 30 kg ha⁻¹ no tuvo efecto sobre el rendimiento de granos ni tampoco afectó la calidad y contenido de nutrientes. Este trabajo muestra el potencial del material genético local, el cual exhibió un desempeño superior al de variedades comerciales, por lo que debiera ser considerado en los programas de mejoramiento genético de lentejas.

1.- Introducción

La lenteja (*Lens culinaris* M.) es una leguminosa anual de estación fría, autopolinizante, diploide, que posee ancestros silvestres ampliamente distribuidos en la cuenca del Mediterráneo, Asia y África (Jackson, 1989; Erskine et al., 2009). El género *Lens* está constituido por cuatro especies: *L. ervoides*, *L. lamottei*, *L. nigricans* y la lenteja cultivada *L. culinaris*, de la cual se desprenden cuatro subespecies: *culinaris*, *orientalis*, *tomentosus* y *odemensis* (Wong et al., 2015). Este cultivo ha presentado un aumento sostenido en la producción internacional, debido a la creciente demanda mundial por proteína de alta calidad y de bajo costo. A nivel mundial la superficie sembrada alcanzó los 4,8 millones de hectáreas (ha) en 2019, siendo Asia y América los continentes donde más se cultiva esta especie con 2,4 y 1,6 millones de ha y con rendimientos de 1,4 y 0,9 ton por ha, respectivamente. Para el mismo año, el mayor productor en América fue Canadá con 1,4 millones de ha, mientras que en Latinoamérica las superficies son intrascendentes en comparación a países como Canadá,

India, Turquía y EEUU, aun así, destacan Argentina con cerca de 12 mil ha y Colombia con 6 mil ha, aun menor es la superficie sembrada en Chile, llegando a las 1.731 ha en 2019 (FAOSTAT, 2021).

La producción nacional de lenteja se caracteriza por un escaso nivel tecnológico, empleando técnicas tradicionales de cultivo y con escasa adaptación a prácticas como la mecanización de las labores, el uso de semilla certificada, la inoculación de semillas con bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico, la incorporación de variedades de ciclo corto o aquellas resistentes a herbicidas. Países como Canadá han introducido más tecnología a la producción, lo que los ha llevado a cultivar grandes extensiones y aumentar los rendimientos de forma que satisface la demanda interna y presenta una alta capacidad de exportación (Chant, 2004; Sarker y Erskine, 2006; Zakeri et al., 2012) . El uso variedades resistentes a herbicidas ha sido uno de los grandes avances internacionales a nivel productivo (Fedoruk y Shirtliffe, 2011; Rizwan et al., 2017). La aplicación post emergente de herbicidas en la variedad BARI masur-5, resultó en un rendimiento de 1,08 ton ha⁻¹, superior al control sin aplicación que obtuvo una producción de granos de 0,62 ton ha⁻¹ (Aktar et al., 2013). La adopción de esta tecnología (semillas certificadas) por parte de los agricultores, junto a otras labores, pueden mejorar la producción, como por ejemplo: se ha comprobado que la inoculación con rizobacterias en lentejas tiene un efecto favorable sobre el rendimiento y es comparable a la aplicación de N sintético, pero con un menor costo (Zakeri et al., 2012). Begom et al. (2021), realizaron ensayos con diferentes dosis de N (20, 40, 60, 80 kg de urea por ha) e inoculación con bacterias, los rendimientos más altos fueron alcanzados con el uso de rizobios, llegando a producir 2,08 ton ha⁻¹. Otra importante labor es el establecimiento de poblaciones óptimas de plantas, las que se ha demostrado aumentan la competencia del cultivo frente a malezas. Muehlbauer et al. (1995), señalan que poblaciones de 90 plantas por m² a emergencia pueden presentar un buen desempeño frente a las malezas. Así también, se ha comprobado que los rendimientos de las lentejas son relativamente estables en una amplia gama de densidades de población, en menores densidades las plantas aumentan el número brotes laterales (Andrews y Mckenzie, 2007).

En el último año las leguminosas de grano como la lenteja, han experimentado un renovado interés, aumentado la demanda y el consumo, hecho principalmente asociado a la incertidumbre de la pandemia causada por el Covid-19. La recesión económica global y la

disminución de los ingresos en los consumidores, generarán oportunidades para las legumbres como fuente económica de proteínas en comparación a las proteínas de origen animal (Semba et al., 2021).

Los rendimientos de lenteja en Chile son de 0,29 ton ha⁻¹ más bajos que el promedio mundial de 1,1 ton ha, sin embargo, se pueden llegar a rendimientos más altos con la introducción de prácticas que, si bien no son innovadoras en el ámbito científico, pueden generar un impacto positivo sobre la producción de lentejas a nivel local. En este trabajo se determinó el efecto de diferentes tipos de fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de grano y aspectos relacionados con la calidad, como el calibre y la composición mineralógica de los granos de lenteja en la Región del Maule, Chile.

2.- Materiales y métodos

2.1.- Material vegetal, sitio experimental y condiciones de crecimiento

Se realizó un primer experimento en la temporada 2018 para evaluar el comportamiento agronómico de cuatro genotipos de lentejas. Dos variedades de lentejas: Súper Araucana y Calpún, liberadas por el Programa de Mejoramiento de Legumbres del INIA, y dos ecotipos locales: Loma y Vega, los que son ampliamente utilizados por los productores de la zona en estudio. En este experimento, se evaluó el efecto del genotipo y de la fertilización N sobre el rendimiento de grano, sus componentes y calidad de grano.

Este experimento contó con la colaboración de un agricultor local de la localidad de Chanco, Región del Maule, Chile. El campo está ubicado a 35°42'44.6"S 72°31'07.0"W y a una altitud de 117 m.s.n.m., y se encuentra a 5 km de la línea costera. El suelo está clasificado como Entisol según la Soil Staff Survey (USDA, 2005), ocupando terrazas marinas con topografía ondulada.

Los cuatro genotipos fueron cultivados en tres tratamientos (T): control sin fertilización nitrogenada (T1); 30 kg N ha⁻¹ (T2); e inoculación con bacterias fijadoras de N₂ (T3). Previo a la siembra se realizó una desinfección de semilla con carbendazima y mancozeb (Anagran Plus ®) en una dosis de 125 g del producto comercial para 100 kilos de semilla, excepto en el T3 para evitar dañar las rizobacterias. La siembra se realizó el 18 de junio de 2018, con un espaciado entre hileras de 11 cm, lo que resultó en 800.000 plantas por hectárea (80 plantas m²). El ensayo se estableció en parcelas de 12 m² (3 m de ancho x 4 m de largo), con cuatro

repeticiones por tratamiento. El diseño experimental tuvo 4 bloques, cada bloque contenía una réplica de los cultivares y de los tratamientos. Se aplicó una fertilización basal en todo el sitio experimental con 150 kg ha⁻¹ de triple superfosfato (46% P₂O₅) y 200 kg ha⁻¹ de Sulfato de potasio (50% K₂O). Los fertilizantes se incorporaron con una rastra de discos antes de la siembra. Las malezas se controlaron con la aplicación de linuron (750 g ia ha⁻¹), aplicado en preemergencia más la eliminación manual de forma post emergente. La cosecha de las parcelas se realizó manualmente el 20 de diciembre de 2018, los granos de lenteja fueron separados en el laboratorio para registrar parámetros de rendimiento y tamaño del grano.

En 2019 se llevó a cabo un segundo experimento en la misma ubicación que se describió anteriormente, con el objetivo principal de comparar a escala de campo las recomendaciones agronómicas derivadas del primer experimento con las prácticas de manejo reales de los agricultores. Así, el 22 de junio de 2019 se sembraron las parcelas demostrativas (PDs) en un área de 6000 y 9000 m² para el ecotipo Loma y Vega respectivamente y siguiendo las prácticas agronómicas empleadas en el primer experimento (fertilización basal con P y K y manejo de malezas). Las practicas realizadas en las PDs fueron comparadas con dos agricultores de la zona: Sr. Vidal Opazo (Agricultor 1) y Sr. Francisco Pereira (Agricultor 2). El Agricultor 1 realizó prácticas de manejo de acuerdo a lo recomendado, a saber: desinfección de semillas, fertilización, control químico de malezas en pre y post emergencia (post emergencia solo gramíneas, cletodim 125 g ia ha⁻¹) y aplicaciones anti fúngicas preventivas (roya y antracnosis). En contraparte, el Agricultor 2 solo realizó las prácticas de desinfección de semillas y control mecánico de malezas de hoja ancha. Ambos agricultores realizaron siembra al voleo a diferencia de las PDs en donde se realizó mecánicamente con una sembradora cerealera a un espaciamiento entre hileras de 34 cm. Las principales diferencias del manejo agronómico entre agricultores fueron la cantidad de N aplicado, el Agricultor 1 aplicó 46 kg de N como urea, mientras que el agricultor 2 no realizó ningún tipo de fertilización (Cuadro 1). El rendimiento de grano y el índice de cosecha (IC) fueron determinados al momento de la cosecha el 03 de diciembre de 2019. Para esto, en cada PD se cosecharon plantas desde 10 mini parcelas de 1 m² en diferentes lugares de cada sitio. Los granos se separaron de las plantas en el laboratorio en donde se pesaron y registraron el peso de los granos y de la planta.

Cuadro 1. Manejo agronómico propuesto en la parcela demostrativa (DP) versus lo realizado por dos agricultores en la temporada 2019-20.

Lugar y ubicación geográfica	Ecotipo	Sistema de siembra	Fertilización (kg N-P-K ha ⁻¹)	Control de malezas (pre-emergencia y graminicida post emergente)	Control de enfermedades (Roya y Antracnosis)	Superficie (ha)
PD ecotipo Loma 35°42'44.6"S 72°31'07.0"W	Loma	Mecanizada	0-150-200	si	si	0,6
PD ecotipo Vega 35°42'44.6"S 72°31'07.0"W	Vega	Mecanizada	0-150-200	si	si	0,9
Agricultor 1 35°41'38.8"S 72°30'10.6"W	Loma	Al voleo	46*-0-0	si	si	2
Agricultor 2 35°40'50.1"S 72°29'12.1"W	Loma	Al voleo	0-0-0	no	no	2

* Aplicación post emergente, por desbalance nutricional evidente

2.2.- Evaluaciones

En cada parcela se evaluaron los siguientes rasgos: índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI), cobertura de dosel (%), rendimiento de grano, índice de cosecha y composición mineralógica de los granos. Adicionalmente, se registró el peso de 100 granos y el calibre de las semillas.

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se midió con el sensor espectro radiómetro de mano GreenSeeker (Trimble, EE. UU.). El NDVI corresponde a la diferencia entre la reflectancia (R) en el infrarrojo cercano (760 nm) y la banda roja (660 nm), y se calcula como: $(R_{760} - R_{660}) / (R_{760} + R_{660})$. Las mediciones se realizaron en la parte central de cada parcela, en diferentes estados fenológicos del cultivo. Los valores de NDVI se representan a través del tiempo, expresado como días después de la siembra. La cobertura del dosel se obtuvo mediante imágenes rojo-verde-azul (RGB) recolectadas en diferentes

fechas durante la temporada de crecimiento usando una cámara digital (Sony® modelo DSC-H300). Posteriormente, las imágenes registradas de cada parcela se analizaron utilizando la herramienta CerealScanner (<https://gitlab.com/sckefauver/cerealscanner>) de la plataforma de análisis de código abierto ImageJ FIJI (Fiji is Just ImageJ; <http://fiji.sc/> Fiji), que se utilizó para extraer los diferentes parámetros de información de coloración de las imágenes (Kefauver et al., 2017). En la cosecha, se midieron el rendimiento de grano y el índice de cosecha (IC). La composición mineralógica de los granos se determinó de acuerdo con los procedimientos químicos chilenos para materiales vegetales (Sadzawka et al., 2007). Se determinó el contenido de proteína de forma indirecta multiplicando la concentración de N por el factor 6,25 (Jones, 1941).

2.3.- Caracterización del material vegetal

Las variedades de lenteja corresponden a material desarrollado por INIA a excepción de los ecotipos locales de lenteja ´de Loma` y ´de Vega`, la información respecto a características generales es escasa, pero existe información reportada de días a floración y de días a cosecha. La información recolectada de literatura es comparada con los observado en campo durante la primera temporada de ensayos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Peso de 100 granos, días a floración y a cosecha para las variedades y/o ecotipos empleados en el ensayo de campo de *Lens culinaris* Medik, Chanco, Región del Maule.

Genotipo	Días a floración reportados por INIA (DDS)	Días a floración observados (DDS)	Peso de los 100 granos (g) reportados por INIA	Peso de los 100 granos (g) obtenidos	Días a madurez de cosecha reportados por INIA (DDS)	Días desde siembra a madurez de cosecha observados 2018/19 (DDS)	Días desde siembra a madurez de cosecha observados 2018/19 (DDS)
Súper Araucana-INIA	146	127	7,8	6,5	200	185	-
Calpún-INIA	-	116	8	6,6	-	177	-
De Loma	-	127	-	6,59	-	185	164
De Vega	-	116	-	5,51	-	185	164

DSS: Días después de siembra.

-: sin información.

Cuadro 3. Precipitaciones históricas, anuales (2018 y 2019) y aquellas ocurridas durante la temporada de crecimiento del cultivo y la variación para ambas temporadas de ensayos de *L. culinaris* en Chanco.

Comuna	Precipitación histórica (mm)	Precipitación anual (mm)		Precipitación durante el periodo de crecimiento del cultivo (mm)		Variación (%)
		2018	2019	2018/19	2019/20	
		Chanco	855	587,0	536,4	

Fuente: Elaboración propia con datos de la red de estaciones meteorológicas INIA; Reserva Nacional Federico Albert, CONAF y Santibáñez, 2017.

La precipitación para la localidad de Chanco fue tomada de la base de datos de la reserva nacional Federico Albert, perteneciente a la Corporación Nacional Forestal (CONAF). La precipitación histórica para la zona es superior a las precipitaciones ocurridas en 2018 y 2019, existiendo un déficit promedio de 31,4 y 37,3% para la comuna durante los años 2018 y 2019, respectivamente. Las precipitaciones ocurridas durante el periodo de crecimiento del cultivo en lenteja sufrieron una variación del 16,7% al comparar ambas temporadas de ensayos, afectando la distribución de las precipitaciones (Fig.1).

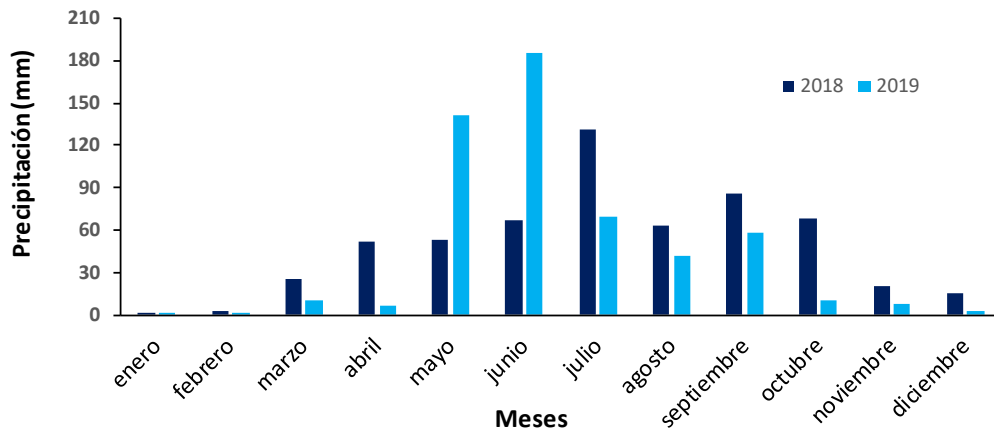


Figura 1. Distribución de las precipitaciones en la comuna de Chanco para el 2018 y 2019. Elaboración propia con datos de la red de estaciones meteorológicas INIA.

2.4.- Análisis de datos

El primer experimento, realizado el año 2018, fue evaluado mediante análisis de varianza multifactorial (MANOVA), siendo las fuentes de variación: fertilización N y genotipos. Para rendimiento de grano y calibre, la principal fuente de variación fue el genotipo, por lo que esos parámetros se probaron mediante ANOVA de una vía y las medias se separaron

mediante la prueba de Tukey (valor de $p < 0.05$). Para la composición mineralógica de los granos, las fuentes de variación fueron el genotipo y fertilización N, por lo que se analizó con un MANOVA para explicar las diferencias observadas. En el segundo experimento, se utilizó al agricultor como factor único y se realizó un ANOVA de una vía. Los análisis estadísticos se realizaron con el software Statgraphics Centurion® y los gráficos fueron hechos con GraphPad Prism® v8.

3.- Resultados

3.1.- Rendimiento y calibre de los granos

En el primer experimento realizado el 2018, no se observaron variaciones producto de la modificación en la fertilización nitrogenada, indicando como la principal fuente de variación el genotipo utilizado (Cuadro 4), siendo el ecotipo de Vega el que obtuvo el mayor rendimiento (Fig. 2a), con 27,1 qq ha⁻¹ en promedio para los diferentes tratamientos (Fig. 2b). Los rendimientos para el ecotipo de Loma y las variedades Súper Araucana-INIA y Calpún-INIA fueron de 37,1, 38,9 y 52,9% más bajas que el registrado para el ecotipo de Vega, respectivamente (Fig. 2b).

Cuadro 4. Efecto del tipo de fertilización nitrogenada y el uso de genotipos sobre el rendimiento de grano de *Lens culinaris*. Chanco, Región del Maule, Chile. ANOVA, gl: grado de libertad, MS: cuadrados medios, relación F: F.

Fuente de variación	Gl	MS	F	Valor-p
Tipo de Fertilización	2	3,89	0,10	0,9079
Genotipo	3	764,61	19,00	0.000
Tipo de Fert. X Genotipo	6	50,53	1,26	0,3019
Within Groups	36	40,24		
Total	47			

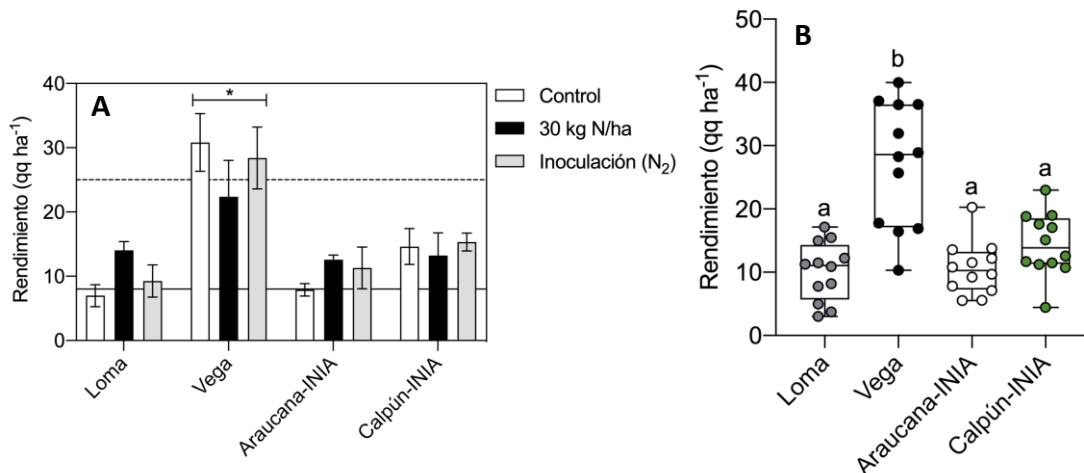


Figura 2. Rendimientos de grano de cuatro genotipos de *Lens culinaris*. en respuesta a diferentes tipos de fertilización nitrogenada. Las diferencias estadísticas se muestran después de una prueba de ANOVA, letras diferentes indican diferencias entre los tratamientos después de la prueba de Tukey ($P < 0.05$).

En relación con los tratamientos sólo se observaron algunas tendencias; en Loma y Súper Araucana el mayor rendimiento se alcanzó con la aplicación de 30 kg N ha⁻¹, alcanzando 14,03 y 12,6 qq ha⁻¹ para loma y Súper Araucana respectivamente. Para el ecotipo de Vega el mejor tratamiento fue el control (sin fertilización N y con desinfección de semillas) obteniendo **30,8** qq ha⁻¹, en tanto que para Calpún, el tratamiento con inoculación con bacterias fue el mejor llegando a producir **15,3** qq ha⁻¹.

En cuanto a tamaño de grano (calibre) (Fig. 3), el ecotipo de Loma tuvo mayor % de granos grandes (mayor calibre) que el resto de los genotipos, mientras que el ecotipo de Vega, registró el menor % con calibre 6 mm. Además, el ecotipo de Loma mostró diferencias con los otros genotipos ($P < 0.05$) (Fig. 3b). En tanto en calibres más pequeños, de Vega mostró diferencias con el resto de genotipos ($P < 0.05$) (Fig. 3cd). La distribución de calibre entre los cuatro genotipos indica que el ecotipo de Loma presenta mayor cantidad de granos con calibre 7 mm (41%) y 6mm (55%) (Fig. 3ab). Mientras que el ecotipo de Vega posee 1% de calibres de 7 mm, 72% con granos de 6 mm y un 26% de 5mm (Fig. 2abc). Por otra parte, Súper Araucana presentó una distribución de 24% para granos de 7mm y 70% para granos de 6mm, similar distribución de calibre mostró Calpún con un 25% para granos de 7mm y un 69% para granos de 6mm. Calibres de 4mm o menores casi no están presentes en los genotipos estudiados (Fig. 3d).

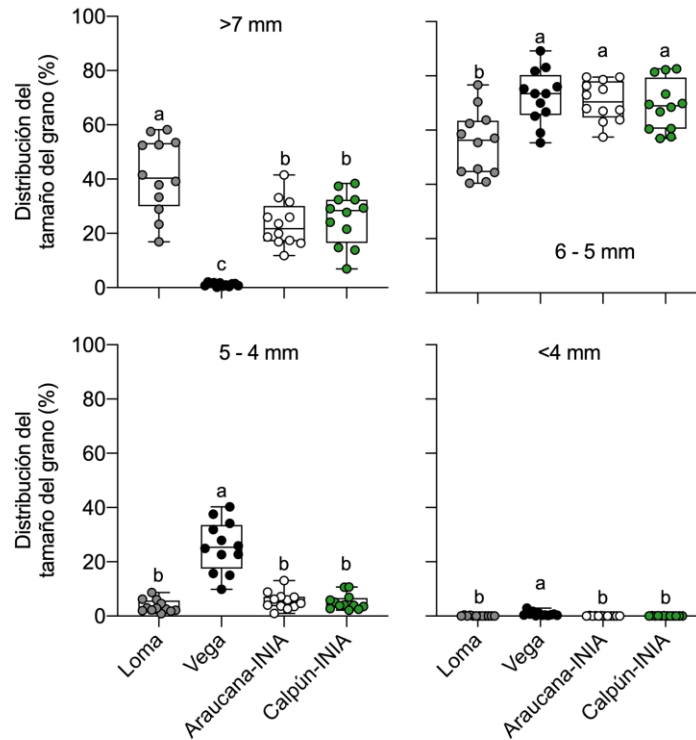


Figura 3. Distribución de calibre para cuatro cultivares de *Lens. culinaris*. en respuesta a diferentes tipos de fertilización nitrogenada. Letras diferentes indican diferencias entre los cultivares después de la prueba de Tukey ($P < 0.05$).

3.2.- Aspectos fisiológicos

Las mediciones del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) no mostraron diferencias estadísticas entre variedades, ni tampoco entre tratamientos, obteniéndose la máxima lectura de NDVI en aproximadamente los 158 días después de la siembra (DDS). El ecotipo de Loma mostró el mayor valor de NDVI con 0,84 en el tratamiento con 30 kg N. Para el mismo ecotipo y durante el mismo día de evaluación, el tratamiento control presentó un valor de 0,81 y el tratamiento con inoculación de rizobios un valor de NDVI de 0,83 (Fig. 4).

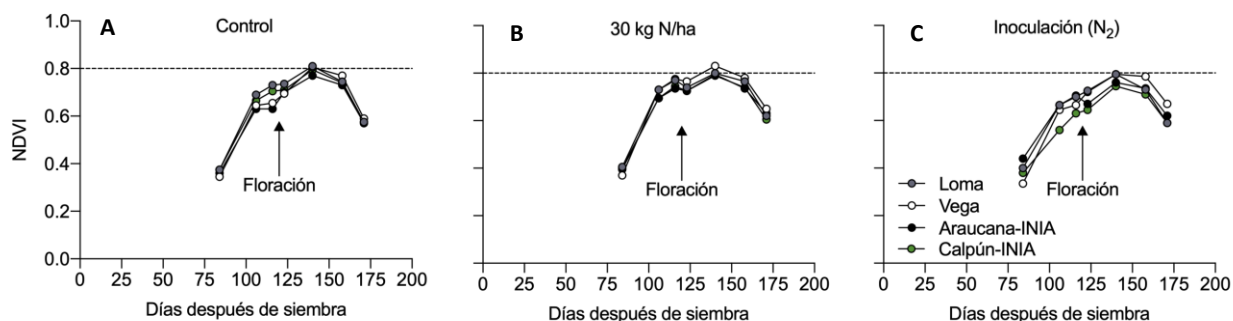


Figura 4. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para cuatro cultivares de *L. culinaris*. Bajo tres tratamientos A) Control; B) 30 Kg de N ha⁻¹ y C) inoculación con rizobacterias. Letras diferentes indican diferencias entre los tratamientos después de la prueba de Tukey (P < 0.05).

Al igual que las mediciones de NDVI, la cobertura del dosel no presentó diferencias estadísticas entre tratamientos y variedades, la floración se presenta previo a la máxima medición registrada. El ecotipo de Vega, independiente del tratamiento, se mantuvo verde por más tiempo (Fig. 5), donde la caída en la curva de cobertura es menos pronunciada que para el resto de las variedades.

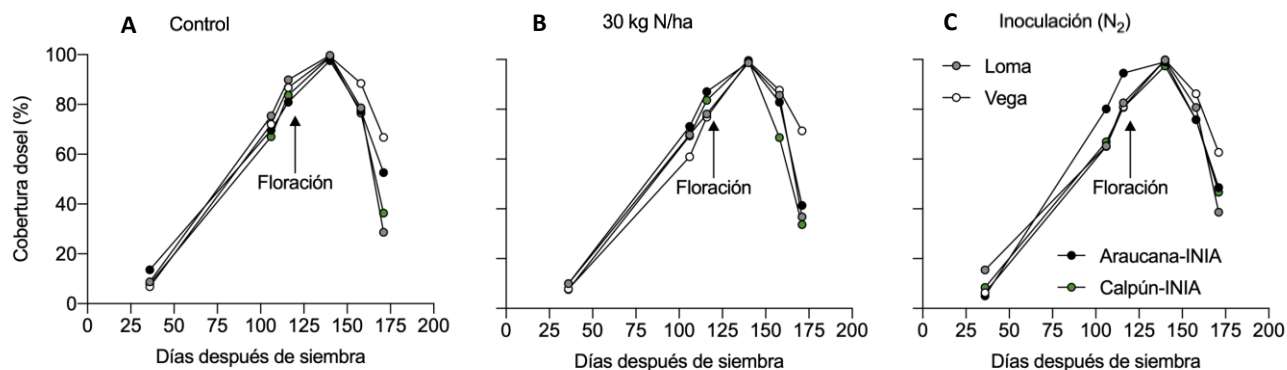


Figura 5. Cobertura del dosel para cuatro cultivares de *Lens Culinaris*. Bajo tres tratamientos Control (A); 30 Kg de N ha⁻¹(B) e Inoculación (C).

La aplicación de funguicida (Carbendazima + Mancozeb [Anagran ® Plus]) a la semilla previo a la siembra en los tratamientos control y en el tratamiento con 30 unidades de N por ha (T1 y T2), aumentó la población de plantas establecidas en comparación a las semillas no tratadas del tratamiento con inoculación con rizobios (T3). El conteo de plantas se realizó transcurridos 15 días desde la emergencia, obteniendo en promedio 67 plantas por m² para

los Tratamientos T1 y T2, lo que representa un 83,8% de plantas emergidas en relación a una población ideal de 80 plantas por m², al contrario, las parcelas no tratadas T3 (tratamiento inoculación con bacteria) presentaron una emergencia de 46 plantas por m² lo que equivale al 57,5% de las plantas en relación al óptimo.

3.3.- Análisis mineralógico

El análisis mineralógico de los granos mostró interacción significativa entre el tratamiento y genotipo (Cuadro 5). La concentración de N no fue afectada por el tipo de fertilización, pero si se observaron diferencias entre genotipos, el ecotipo Loma presento la mayor concentración de N en los granos con una concentración de 3,99%, por su parte Vega presentó la menor concentración con 3,76%. Si bien entre tratamientos no se registraron diferencias entre tratamientos la mayor concentración de N se obtuvo con la inoculación con bacterias en el genotipo de Loma llegando al 4,11%. Para P se encontraron diferencias por efecto del tipo de fertilización, control presento una concentración de 1,09%, valores inferiores en comparación a los tratamientos de adición de N e inoculación, la máxima concentración de P alcanzó los 0,43% para 3 de las 4 variedades, exceptuando Vega, en el tratamiento de inoculación con bacterias. En cuanto al contenido de K los valores obtenidos son bastantes similares entre genotipo y tipo de fertilización, aun así, la máxima concentración se encuentra en el ecotipo Vega con la adición de 30 kg N ha⁻¹ con 1,22% (Cuadro 5).

Cuadro 5. Concentración de nutrientes de granos de *Lens culinaris*. que crecen bajo diferentes tratamientos de manejos de fertilización N en la primera temporada. Chanco, Región del Maule, Chile.

Genotipo	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Cu	Fe	B
	----- g 100 g ⁻¹ -----					----- mg kg ⁻¹ -----				
<i>Control</i>										
Loma	3,91	0,37	1,07	0,05	0,12	16,09	49,96	9	69	6
Vega	3,75	0,37	1,13	0,06	0,13	18,26	50,65	9	76	6
S. Araucana	3,75	0,37	1,03	0,04	0,12	19,49	36,44	9	71	6
Calpún	3,99	0,39	1,11	0,04	0,10	12,99	48,43	9	79	7
<i>30 kg N ha⁻¹</i>										
Loma	3,96	0,40	1,07	0,04	0,12	16,28	52,43	9	70	8
Vega	3,78	0,39	1,22	0,06	0,13	17,83	53,58	8	76	6
S. Araucana	3,85	0,40	1,02	0,05	0,12	13,50	35,33	9	78	9
Calpún	3,95	0,43	1,21	0,04	0,10	11,41	49,74	10	80	8
<i>Inoculación con bacterias</i>										
Loma	4,11	0,43	1,11	0,06	0,13	17,66	53,98	10	83	7
Vega	3,76	0,40	1,18	0,05	0,13	19,10	53,70	8	82	9
S. Araucana	3,83	0,43	1,07	0,04	0,11	11,30	35,95	9	63	6
Calpún	3,86	0,43	1,18	0,04	0,10	13,06	47,66	10	76	10
<i>Promedios por tratamiento de N</i>										
Control	3,85	0,37	1,09	0,05	0,12	16,71	46,37	8,98	73,87	6,27
30 kg ha ⁻¹	3,88	0,40	1,13	0,05	0,12	14,75	47,77	8,95	75,68	7,57
Inoc. con bacterias	3,89	0,42	1,14	0,05	0,12	15,28	47,82	9,13	76,21	8,08
<i>Promedios por genotipo</i>										
Loma	3,99	0,40	1,08	0,05	0,13	16,68	52,12	9,13	74,14	6,80
Vega	3,76	0,39	1,18	0,06	0,13	18,40	52,64	8,44	77,89	7,23
S. Araucana	3,81	0,40	1,04	0,05	0,12	14,76	35,90	9,10	70,68	6,97
Calpún	3,94	0,42	1,17	0,04	0,10	12,49	48,61	9,40	78,29	8,23
<i>Fuentes de Variación</i>										
	<i>Valor-p</i>									
Genotipo	0,018	0,740	0,000	0,167	0,000	0,000	0,000	0,488	0,553	0,361
T. Fert. N	0,830	0,093	0,118	0,992	0,967	0,002	0,532	0,952	0,909	0,052
Genotipo x T. Fert. N	0,760	0,982	0,654	0,685	0,611	0,000	0,785	0,668	0,560	0,228

Respecto al contenido de micronutrientes, La variedad Calpún mostró una disminución del 32,1% (5,9 ppm) del contenido de Mn en comparación al ecotipo Loma, la que alcanzó la máxima concentración en el tratamiento inoculación con bacterias. De igual forma para Zn la máxima concentración se encontró en Loma con inoculación con bacterias alcanzando en

promedio 53,98 ppm, al contrario la variedad Súper Araucana presentó la concentración más baja para Zn, la que es 31,3% más baja que el promedio de Loma y Vega equivalente a 16,4 ppm; dicha diferencia es menor al comparar a S. Araucana con Calpún para el mismo elemento, observándose una disminución del 26,1% o 12,7 ppm. Referente a la concentración de Fe no hay diferencias estadísticas, el genotipo de Loma presenta la máxima concentración con 83 ppm, sin embargo, el promedio independiente del genotipo o el tipo de fertilización es de 75 ppm (Cuadro 5).

Desde el punto de vista nutricional al convertir el contenido de N en proteína se observa que la máxima concentración de proteína se alcanza en el ecotipo de Loma con la inoculación de las semillas con bacterias, alcanzando un 25,6%. La menor concentración la obtuvo el genotipo Vega bajo la condición de Control con un 23,4%.

3.4.- Ensayo extensivo

En base a los resultados obtenidos durante la primera temporada (2018/2019), se establecieron dos parcelas demostrativas (PD) durante la temporada 2019/2020. En estas dos parcelas demostrativas varió el ecotipo utilizado: una parcela con de Vega y otra con de Loma. La decisión anterior está basada en el rendimiento del ecotipo de Vega, el cual fue el más alto durante la temporada 2018/2019 (Fig. 2), mientras que también se decidió sembrar de Loma debido a su mayor proporción de granos con tamaño superior a 7 mm (Fig. 3), lo cual es atractivo para los agricultores. Sumado a lo anterior, estos ecotipos son los más cultivados por los agricultores de la zona.

El rendimiento de las parcelas demostrativas fue medido dos veces. Una de ellas correspondió a la medición obtenida a partir de 10 mini parcelas de 1 m² tomadas de forma aleatoria en la parcela demostrativa (Fig. 6A) y la segunda, mediante la trilla completa de la parcela demostrativa realizada por el agricultor. Los rendimientos determinados por la trilla completa indican que la parcela demostrativa sembrada con el ecotipo de Loma obtuvo un rendimiento de 9 qq ha⁻¹; y la parcela sembrada con el ecotipo de Vega, 18 qq ha⁻¹. Por otra parte, el Agricultor 1, quien sembró el eco tipo de Loma, tuvo un rendimiento de 22 qq ha⁻¹ y el Agricultor2, con el mismo ecotipo, obtuvo un rendimiento de 13 qq ha⁻¹. Los rendimientos reportados contrastan con el rendimiento determinado cosechando las 10 mini

parcelas, pero mantienen la tendencia, a excepción de la parcela demostrativa sembrada con el ecotipo de Loma (Fig. 6).

Los valores de IC obtenidos tanto para las PDs como para los sitios de los agricultores son similares, siendo mayor este índice para el agricultor 2 que alcanzo un IC de 0,43 (Fig. 6B).

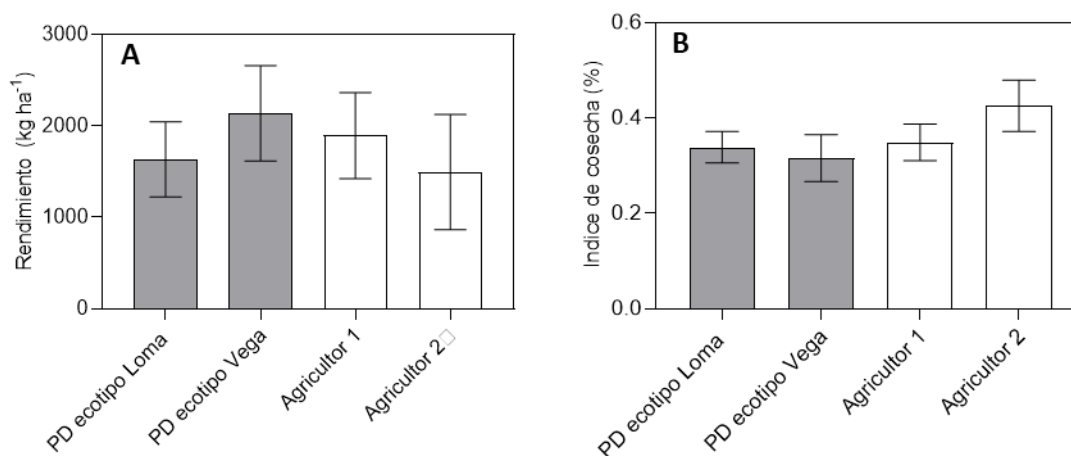


Figura 6. Rendimiento de grano e Índice de cosecha (IC) para el cultivo de *Lens Culinaris* en parcelas de demostración (PDs) a escala de campo con los ecotipos de Loma y Vega en comparación con los valores obtenidos por dos agricultores que manejaron el cultivo de forma similar. El agricultor 1 (Sr. Vidal Opazo) y el agricultor 2 (Sr. Francisco Pereira).

La cobertura del dosel en este ensayo mostró que el ecotipo de Loma obtuvo la máxima cobertura transcurridos 106 DDS, llegando a 90,4% de cobertura. Por su parte, el ecotipo de Vega utilizado en la parcela demostrativa presentó su máxima cobertura del dosel a los 120 DDS alcanzando un valor máximo promedio de 96,4%. En las parcelas de los agricultores, la máxima cobertura ocurrió a los 103 DDS, llegando a 90,05 y 90,1% de cobertura, respectivamente.

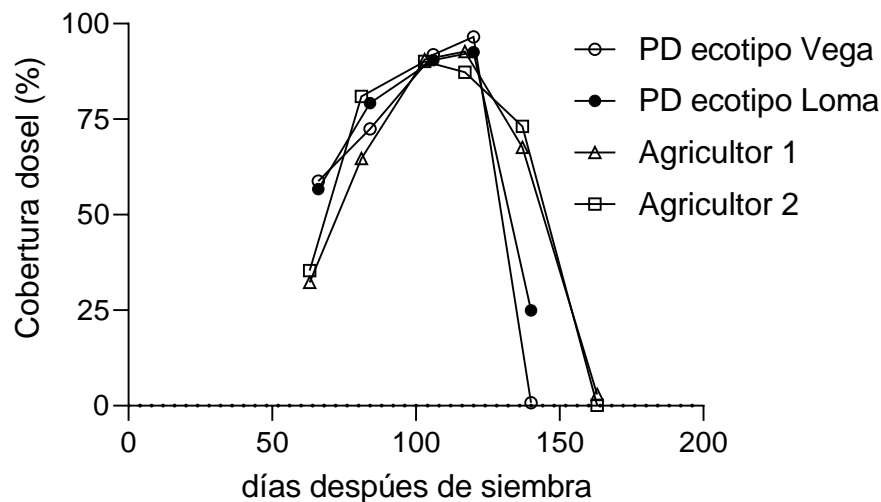


Figura 7. Cobertura de dosel para el cultivo de *Lens Culinaris* en parcelas de demostración (PDs) a escala de campo con los ecotipos de Loma y Vega en comparación con los valores obtenidos por dos agricultores que manejaron el cultivo de forma similar. El agricultor 1 (Sr. Vidal Opazo) y el agricultor 2 (Sr. Francisco Pereira).

4.- Discusión

Rendimientos nacionales inferiores al promedio mundial, pero aumentando

Durante el año 2019, el rendimiento mundial de lentejas fue cercano a los 5,7 millones de toneladas, con un rendimiento promedio de $1,1 \text{ ton ha}^{-1}$, mientras que, para el mismo año en Chile, el rendimiento fue de $0,8 \text{ ton de grano por ha}$ (FAOSTAT 2020). En el mundo la lenteja se establece como un cultivo de ciclo corto, con 90 a 120 días de siembra a cosecha, a diferencia de la producción en Chile en donde el periodo de crecimiento puede llegar a los 200 días (Zakeri et al., 2012). Si bien un ciclo de crecimiento largo puede favorecer la producción de biomasa, los escenarios de producción local son diferentes, puesto que las condiciones de estrés por falta de lluvia y un deficiente manejo de malezas en esta especie poco competitiva, actúan en desmedro de la producción de granos (Ghanem et al., 2015).

Tanto la cantidad como la distribución de las precipitaciones durante el periodo de crecimiento del cultivo tienen una gran incidencia sobre el desarrollo de las plantas, ya que estas reaccionan a los cambios de disponibilidad hídrica acortando o prolongando su ciclo de vida (Turner et al., 2001). En la primera temporada de ensayos, precipitaron 452 mm de agua durante el periodo de crecimiento del cultivo (jun-dic), mientras que en la segunda temporada

y en el mismo periodo, el agua caída fue de 376,7 mm, con una disminución del 16,7% (Cuadro 3). Durante la floración y formación de vainas y llenado de grano de la temporada 2018/2019 se registró 105,4 mm, los que permitieron alcanzar rendimientos de hasta 27,1 qq ha⁻¹ con el ecotipo de Vega (Fig. 2). En contraste, para el mismo periodo en la temporada de ensayos extensivos (2019/2020), la cantidad de agua caída fue de 21,1 mm, con una disminución de 80%, lo que redujo el ciclo de crecimiento del cultivo en 21 días respecto a la temporada anterior, necesitando 164 DSS a la madurez de cosecha. Sin embargo, la cantidad de días a floración no fue afectada, debido a que en el periodo entre emergencia y floración no hubo estrés hídrico a diferencia de lo ocurrido post floración. La aceleración del ciclo de crecimiento por efecto de la baja en la disponibilidad hídrica afectó la producción de granos, el ecotipo de Vega presentó una reducción de 21,1% del rendimiento (~5,7 qq) en comparación a la temporada de ensayos experimentales.

Existe cierta discrepancia entre los resultados obtenidos y la información reportada por los obtentores de las variedades, en cuanto al peso de los 100 granos, días a floración y a cosecha, esta diferencia puede obedecer a la variación en las condiciones medioambientales, si bien la duración del ciclo no es igual a lo reportado se mantiene la tendencia (Cuadro 2). Las variedades de lenteja utilizadas, Súper Araucana-INIA y Calpún-INIA, se caracterizan por poseer un ciclo productivo largo llegando a necesitar 200 días para alcanzar la madurez de cosecha. Los requerimientos de días grado acumulado en base una temperatura (T_b) de 5°C (Miller et al., 2001), fueron de 1.117 para la temporada de ensayos experimentales, mientras que en la segunda temporada se acumularon 940 días grados.

Ecotipos locales de lenteja poseen mayor adaptabilidad que variedades comerciales

Las diferencias encontradas no provienen de la aplicación de tratamientos de fertilización, existe una clara diferencia entre variedades y ecotipos (Fig.2). Estos últimos presentan una mayor adaptación a las condiciones locales de producción, debido a que el cultivo tradicional de lentejas en esta zona, ha permitido la selección de ecotipos adaptados a producir en áreas restringidas (Ruisi et al., 2015). En esta misma línea, diferentes estudios que comparan ecotipos con variedades introducidas coinciden en que las primeras tienen un desempeño agronómico mejor que las variedades comerciales debido a su mayor adaptación a

condiciones limitantes de producción, donde históricamente se han cultivado (Zaccardelli et al., 2012).

Determinar la productividad de proteína por unidad de superficie es importante desde el punto de vista nutricional de las legumbres, para ello la concentración de N determinada en el análisis mineralógico pudo ser transformado a en proteína (Jones, 1941). Aunque el ecotipo de Vega obtuvo una menor proporción de proteína, de Vega presentó rendimientos muy superiores al resto del material utilizado, por lo que al extrapolar la producción de proteína a nivel de rendimiento por ha, sigue siendo superior el ecotipo de Vega que el resto de las variedades, que en promedio alcanzan los 271 kg ha⁻¹ mientras que de Vega produjo 637 kg ha⁻¹ para la primera temporada. La menor concentración de proteína puede ser explicada debido al efecto de dilución del N como resultado del aumento de la biomasa producida (Ryan et al., 2008).

Cobertura del dosel y densidad de siembra

Durante las fases iniciales de desarrollo de la lenteja, esta es poco competitiva frente a las malezas, por ello, es evidente la necesidad de establecer un número apropiado de plantas a la siembra que permitan alcanzar la máxima cobertura, evitando así dar oportunidad al crecimiento de malezas (Sarker y Erskine, 2006).

A nivel internacional se han realizado diferentes ensayos modificando tanto la densidad de plantas por m² como la distancia entre hileras, y estos estudios concuerdan en que al aumentar el número de plantas por metro cuadrado disminuye la incidencia de malezas. La disminución de la distancia entre hileras tiene un efecto positivo sobre el aumento del vigor temprano del cultivo, lo que también ha demostrado ser efectivo. En un ensayo en donde se probaron diferentes distancias, desde 20 a 50 cm entre hileras, la menor distancia fue la que presentó mayor rendimiento de grano, disminuyendo progresivamente al aumentar la distancia (Silim et al., 1990). Sin embargo, superado un umbral de plantas por unidad de superficie, el rendimiento puede ser afectado por exceso de competencia intra específica (Ball et al., 1997; McDonald et al., 2007).

En ambas temporadas se calculó una dosis de semillas para establecer una densidad de 80 plantas m². En la primera temporada de ensayos, los valores máximos de cobertura del dosel (Fig. 5) no logran cubrir el total de la superficie, lo que indica que el cultivo no alcanza su

máximo potencial de crecimiento o que la densidad de plantas establecidas no fue la óptima. El número de plantas establecida para los tratamientos con desinfección de semillas fue 45% superior en comparación al tratamiento con inoculación que no fue desinfectado, aun así, no hubo diferencias de rendimiento entre tratamientos, lo que ratifica el poder compensatorio que tiene la planta al aumentar el número de ramas laterales. En la temporada de ensayos extensivos, en todos los sitios en los que se utilizó el ecotipo de Loma, los valores obtenidos solo llegaron al 90% de cobertura del dosel, mientras que Vega llegó a un valor máximo de 96,4%, este valor se registró 17 días después de los valores máximos obtenidos en Loma. En el caso de los agricultores, estos realizaron la siembra al voleo, lo que resultó en un menor número de plantas por m² en relación a la siembra mecanizada, presentando una disminución del 30% de plantas a emergencia. En base a los resultados obtenidos se sugiere optimizar tanto densidad como distancia entre hileras de forma específica para cada uno de los ecotipos que presentaron mejor desempeño.

Si bien en la primera temporada de ensayos el ecotipo de Vega también tardó más en alcanzar el máximo de cobertura, la senescencia para la temporada de ensayos extensivos fue más rápida en comparación al ecotipo de Loma en los diferentes sitios de estudio, esto podría deberse a que las precipitaciones, una vez llegado al máximo de cubrimiento, fueron menores que en la primera temporada, con una disminución del 80% en comparación a la primera temporada.

Efecto de la fertilización nitrogenada en lenteja

L. culinaris puede ser establecida en un amplio rango de tipos de suelo y pH, aunque existe evidencia de que esta especie es más sensible a los excesos de humedad y suelos ácidos que otras leguminosas de grano como *Pisum sativum* L. y *Cicer arietinum* (Tang y Thomson, 1996). La lenteja es una planta de bajos requerimientos nutricionales, por lo que productivamente se puede cultivar en suelos marginales (Erskine et al., 2011). Si bien, los granos de esta especie poseen un alto contenido proteico, la demanda de N puede ser cubierta hasta en un 75% por medio de la fijación de N₂ atmosférico (Bremer et al., 1989). Para esto el suelo debe contener el inoculo de la bacteria que crece en simbiosis con la planta. Los rendimientos obtenidos en los ensayos experimentales sugieren que no es necesario aplicar N, ya que, probablemente, los lugares de establecimiento de los ensayos poseen un historial de rotaciones de cultivos donde participa la lenteja, pudiendo quedar el inoculo de *Rhizobium*

en el suelo. En relación a lo anterior, en arveja se comprobó que suelos con historial de cultivo de esta especie, presentaron poblaciones residentes de *Rhizobium leguminosarum* bv, *viciae* que produjeron nodulación comparable a la obtenida mediante la adición de inoculante comercial, en contraposición, plantas de arvejas cultivadas en suelos sin historial de cultivo de legumbres presentaron una deficiente nodulación (Chemining'wa y Vessey, 2006).

Otros antecedentes que apoyan los resultados obtenidos en los ensayos experimentales respecto al nulo efecto de la adición de N sobre la producción de grano son los realizados por Zakeri et al., (2012), en donde evaluaron el efecto de la fertilización N (50 Kg N ha⁻¹) sobre el rendimiento y la precocidad de cosecha en comparación a la inoculación con bacterias, demostrando que la fertilización con N no afectó la producción como tampoco la precocidad del cultivo.

El N disponible en el suelo puede inhibir el proceso de nodulación, algunos autores señalan que concentraciones de 10 ppm de N inhibe el proceso (Leidi y Rodríguez-Navarro, 2000). Considerando lo anterior, con el resultado de los análisis de suelo para ambas temporadas (2018: 11 ppm N y 2019: 12 ppm N), a pesar de que el suelo contó con la cantidad de N necesario para inhibir la acción simbiótica, visualmente las raíces de plantas inoculadas y aquellas a las que se le aplicó N no presentaron diferencias en la nodulación (datos no mostrados).

Las distintas cepas de rizobium poseen diferente grado de efectividad en la fijación del N₂, por ello la inoculación con cepas seleccionadas puede presentar un efecto positivo sobre el rendimiento (Tarek et al., 2021). En contraste, bajo los resultados obtenidos no hubo diferencias en producción de granos derivado de la aplicación de un inoculante comercial y comparado con la nodulación espontánea ocurrida por la presencia de bacterias naturalizadas, lo que podría apuntar a que las cepas que persisten en los campos con historial de cultivo de lentejas presentan un desempeño comparable a las bacterias seleccionadas del inoculante comercial. En consecuencia, la fijación biológica del N₂ es un medio sostenible y más económico para suministrar N al cultivo de lentejas sin la necesidad de aplicar fertilizantes sintéticos.

5.- Conclusión

Este trabajo muestra que el potencial del material genético local, el cual exhibió un desempeño superior al de variedades comerciales, debiera ser considerado en los programas de mejoramiento genético de lentejas. A nivel de introducción de prácticas, una fertilización racional como el establecimiento de un programa fitosanitario (desinfección de semillas, control de enfermedades y malezas gramíneas) resultó en un aumento del rendimiento de granos, permitiendo a los agricultores reducir costos, principalmente asociados a la aplicación de fertilización N que no tiene efecto sobre el rendimiento, debido a la capacidad de las plantas de satisfacer sus requerimientos de N a través de la fijación biológica del N₂.

Bajo las condiciones actuales de pandemia, es evidente un aumento de la demanda de granos de lenteja, por ello la implementación de prácticas que automaticen labores críticas, permitirá a los agricultores aumentar la superficie sembrada y con ello aumentar el retorno y calidad de vida de sus familias. En este sentido, las instituciones públicas debieran fomentar la implementación de maquinaria crucial, como sembradoras y trilladoras mecánicas, que en la actualidad en las zonas productivas no existen o no se adaptan a las condiciones propias del terreno.

6. - Bibliografía

- Andrews M. and McKenzie B. (2007) Adaptation and Ecology. In: Yadav S.S., McNeil D.L., Stevenson P.C. (eds) Lentil. Springer, Dordrecht. Chapter 3. 23–32.
- Ball, D., Ogg, A., and Chevalier, P. (1997). The influence of seeding rate on weed control in small-red lentil (*Lens culinaris*). *Weed Science*, 45(2), 296–300.
- Begom, M., Ahmed, G., Sultana, R., and Akter, F. (2021). Impact of Rhizobium biofertilizer on agronomical performance of lentil (BARI Masur-6) in Bangladesh. 6(2), 114–120.
- Bremer, E., Van, C., and Karamanos, R. (1989). Inoculant, phosphorus and nitrogen responses of lentil. 691–701.
- Chant, S. (2004). Imidazolinone tolerance in lentil (*Lens culinaris* Medik.). University of Saskatchewan Saskatoon (Canada).
- Chemining'wa, G., y Vessey, J. (2006). The abundance and efficacy of *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* in cultivated soils of the eastern Canadian prairie. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(2), 294–302.
- Erskine, W., Muehlbauer, F., Sarker, A. and Sharma, B. (2009). *The Lentil Botany, Production and Uses*.
- Erskine, W., Sarker, A., and Kumar, S. (2011). Crops that feed the world 3. Investing in lentil improvement toward a food secure world. *Food Security*, 3(2), 127–139.
- Fedoruk, L., and Shirliff, S. (2011). Herbicide Choice and Timing for Weed Control in Imidazolinone-Resistant Lentil. *Weed Technology*, 25(4), 620–625.

- Ghanem, M., Marrou, H., Biradar, C., and Sinclair, T. (2015). Production potential of Lentil (*Lens culinaris* Medik.) in East Africa. *Agricultural Systems*, 137, 24–38.
- Jackson, M. (1989). World crops: Cool season food legumes: In *Phytochemistry* (Vol. 28).
- Leidi, E. y Rodríguez-Navarro, D. (2000). Nitrogen and phosphorus availability limit N₂ fixation in bean. *New Phytologist*, 147(2), 337–346.
- McDonald, G., Hollaway, K., and McMurray, L. (2007). Increasing plant density improves weed competition in lentil (*Lens culinaris*). *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 47(1), 48–56.
- Miller, P., McDonald, C., Derksen, D., and Waddington, J. (2001). The adaptation of seven broadleaf crops to the dry semiarid prairie. *Canadian Journal of Plant Science*, 81(1), 29–43.
- Muehlbauer, F., Kaiser, W., Clement, S., and Summerfield, R. (1995). Production and Breeding of Lentil. *Advances in Agronomy*, 54(C), 283–332.
- Rizwan, M., Aslam, M., Asghar, M., Abbas, G., Shah, T., and Shimelis, H. (2017). Pre-breeding of lentil (*Lens culinaris* Medik.) for herbicide resistance through seed mutagenesis. 12(2), 1–15.
- Ruisi, P., Longo, M., Martinelli, F., Di Miceli, G., Frenda, A. S., Saia, S. and Amato, G. (2015). Morpho-agronomic and genetic diversity among twelve sicilian agroecotypes of lentil (*Lens culinaris*). *Journal of Animal and Plant Sciences*, 25(3), 716–728.
- Ryan, J., Pala, M., Masri, S., Singh, M., and Harris, H. (2008). Rainfed wheat-based rotations under Mediterranean conditions: Crop sequences, nitrogen fertilization, and stubble grazing in relation to grain and straw quality. *European Journal of Agronomy*, 28(2), 112–118.

- Sarker, A., and Erskine, W. (2006). Recent progress in the ancient lentil. *Journal of Agricultural Science*, 144(1), 19–29.
- Semba, R., Ramsing, R., Rahman, N., Kraemer, K., and Bloem, M. (2021). Legumes as a sustainable source of protein in human diets. *Global Food Security*, 28, 100520.
- Silim, S. N., Saxena, M. C., & Erskine, W. (1990). (1990) Seeding Density and Row Spacing for Lentil and Rainfed Mediterranean Environments (AJ).
- Tang, C. and Thomson, B. (1996). Effects of solution pH and bicarbonate on the growth and nodulation of a range of grain legume species. *Plant and Soil*, 186(2), 321–330.
- Tarek, M., Rubaiyat, B. and Chowdhury, S. (2021). Effect of rhizobium isolates and nitrogen on nodulation, growth, and yield in lentil. *World Journal of Biology and Biotechnology*, 5(1), 1–3.
- Turner, N. C., Wright, G. C., & Siddique, K. H. M. (2001). Adaptation of grain legumes (pulses) to water-limited environments. *Advances in Agronomy*, 71,193-231.
- Wong, M., Gujaria-Verma, N., Ramsay, L., Yuan, H., Caron, C., Diapari, M., Vanderberg, A. and Bett, K. (2015). Classification and characterization of species within the genus *lens* using genotyping-by-sequencing (GBS). *PLoS ONE*. 10(3), 1–16.
- Zaccardelli, M., Lupo, F., Piergiovanni, A., Laghetti, G., Sonnante, G., Daminati, M., Sparvoli, F. and Lioi, L. (2012). Characterization of Italian lentil (*Lens culinaris* Medik.) germplasm by agronomic traits, biochemical and molecular markers. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 59(5), 727–738.
- Zakeri, H., Bueckert, R., Schoenau, J., Vandenberg, A., and Lafond, G. (2012). Controlling indeterminacy in short season lentil by cultivar choice and nitrogen management. *Field Crops Research*, 131, 1–8.

CAPÍTULO II

Management of iron and manganese toxicities of lentil crops grown in Central Chile

R. Amigo¹, A.M. Méndez-Espinoza², A. R. Schwember³, J. Cornejo⁴, R. Baettig⁵, R. A. Cabeza^{1*}

¹Laboratorio de Nutrición Vegetal, Departamento de Producción Agrícola, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Talca, Casilla 747, Talca, Chile.

²Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA Remehue, Carretera Panamericana Sur km 8 norte, Osorno, Chile.

³Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile, Casilla 306-22, Santiago, Chile.

⁴Instituto de Química de Recursos Naturales, Universidad de Talca, Casilla 747, Talca, Chile.

⁵Escuela de Ingeniería Forestal, Universidad de Talca, 1 Poniente 1141, Talca, Chile.

*Corresponding author: rcabeza@utalca.cl

Abstract. In Chile, lentil is cultivated under rainfed conditions using low fertilizer input, although they are associated to some iron (Fe) and manganese (Mn) toxicities. The main objective of this work was to evaluate two different fertilization strategies (lime (CaCO_3) and nitrogen (N) additions) to reduce Fe and Mn toxicities in lentils. In field lentils showed toxicity symptoms, but without grain yield reductions. In a pot experiment, the dry matter (DM) produced was higher in plants that received N while the lowest DM production was in those plants treated with lime. Higher root DM sustained the growth of the N-fertilized shoots, which also positively affected the grain yields being 33% higher than the control treatment. In the plants fertilized with N, the Fe and Mn levels in the shoots were lower than the control plants and those grown in soils treated with lime, but showed higher concentrations of Fe and Mn in roots. In parallel, roots exhibited high concentrations of Fe and Mn that were 13 and nine-fold higher than in the shoots. A significant decrease of 29% in Mn concentration in the grains of plants treated with N was reported. Our results suggest that an increase in DM by the addition of N can reduce the Mn concentration on leaves to a level that is likely under the threshold that causes toxicity in plant tissues. Finally, we suggest that the increase of Fe and Mn in the roots may be connected to the reduction of these metals on leaves.

Introduction

Lentil production in Chile has decreased since the eighties mainly due to international prices and the low technology used by local farmers which have negatively impacted both yields and surface cropped with this legume species. However, the cultivation of lentils is part of the local traditions and it is an essential component of the crop rotation system that is beneficial for the local markets and the farmers. The lentil production is mainly concentrated in marginal soils of the coastline of Central Chile where the climatic conditions are benign by the buffering effects of the Pacific Ocean. Specifically, Chilean lentil production areas are concentrated in Chanco, Curepto, and Navidad towns which are near the coastline (about 10 km). In the three locations, the soils are derived from sea deposits (Casanova *et al.* 2013), and in all cases are nutrient depleted and degraded soils, either eroded or compacted (Sepúlveda-Caamaño *et al.* 2018). Because of these poor soil conditions, small farmers cultivate crops of low productivity such as lentils, mainly under rainfed conditions and low fertilizers input (Tay *et al.* 2001; Peñaloza *et al.* 2007). Due to their nitrogen-fixing properties, crop rotations with legumes are essential to increase soil nitrogen (N) and soil organic matter (SOM). In this sense, local farmers cultivate lentils and chickpeas in rotation with cereals and pastures to feed farm animals as in other parts of the world (Peoples *et al.* 2001; Pala *et al.* 2007), which is particularly beneficial for lentils grown in Mediterranean environments (Gregory 1998; Pala *et al.* 2007), such as Central Chile.

Since the middle eighties, farmers reported the incidence of plants spotted with black and brown points (Sepulveda and Baherle 1986). At that time, it was not clear whether this phenomenon was caused by pathogens and/or abiotic stress. After a thorough examination and chemical analysis of plant samples, it became evident that high concentrations of iron (Fe) and manganese (Mn) were responsible for the symptomatology previously described (France and Tay 1986a; b; Sepulveda and Baherle 1986). Although Fe and Mn are essential nutrients for all plants, higher concentrations of these nutrients can result in toxicity symptoms (Marschner 2012). Taking a sampling collection obtained in the main lentil production area in Central Chile, the concentration of lentil leaves with black and brown spots reached up to 2120 mg/kg for Fe and 370 mg/kg for Mn, whereas healthy leaves maintained low levels of both elements (743 and 150 mg/kg, respectively) (France and Tay 1986a). Normal concentrations of Fe and Mn are in the range of 200-1000 mg/kg and

100-175 mg/kg, respectively (France and Tay 1986b). Normal foliar concentrations of Fe and Mn in other small grains species fluctuate between 25-250 mg/kg and 20-150 mg/kg, respectively (Havlin *et al.* 2005). The disorder is called locally “*marea negra*” (black tide) or “*sereno*” (sea mist, fog) (Sepulveda and Baherle 1986). The toxicity symptoms are more prevalent in old leaves progressing to the young leaves, which produce initially black and brown spots, and necrosis and the consequent fall of leaves in cases of severe increase of Fe and Mn concentrations (Sepulveda and Baherle 1986). Because of this mineral toxicity, lentil crops reduce yield and the commercial quality of grains that have a negative impact on the farmers economy.

Soil conditions, particularly redox potential and pH, control Fe and Mn availability for the plant (Lindsay 1979; Morrissey and Guerinot 2009). In an experiment with a soil where lentil plants were intoxicated with Fe and Mn, it was demonstrated that the main factor controlling the availability of these elements was the soil redox potential (Ciudad and Ite 1994). In this experiment, they showed that by changing the redox potential by replacing soil oxygen with nitrogen gas, there was an increase of Fe and Mn soil solubility of several folds. The Fe concentration was 0.47 g kg⁻¹ under aerobic conditions, and it increased to 17.2 g kg⁻¹ under anaerobic conditions, whereas there was an increase of 0.17 to 3.4 g kg⁻¹ for Mn. Under normal soil pH and even with high pH values, the low redox conditions render Mn more available (Hue 1988), similar as for Fe (Cao *et al.* 2001). The soils where lentil production in Central Chile is grown have pH ranging from slightly alkaline to acid (pH_w 7.0 to 5.5). Unlike calcareous and sodic soils that are very common in Mediterranean areas as in the Near East and North Africa (NENA) regions, where lentil production is common (Rashid and Ryan 2004; FAO and ITPS 2015), the soils used by lentil farmers in Chile rarely show micronutrient deficiencies. Furthermore, soil organic matter (SOM) is in the range of 2 to 6% (Ovalle *et al.* 1997), which can also contribute to the chelation of Fe and Mn and their availability to the plant. Although, the SOM can also contribute as electron donors to increase ultimately the soil redox potential (Husson 2013).

As a legume species, the roots of lentils can induce the reduction of Fe and Mn by the ferric reductase enzyme expressed on the epidermal cells of roots, which can greatly help the root system to absorb cation micronutrients (Marschner *et al.* 1986; Zuo and Zhang 2011; Sen Gupta *et al.* 2017). Furthermore, because lentils can fix N₂ in symbiosis with rhizobia, there

is an unbalanced uptake of cations that results in pumping H^+ to the rhizosphere to maintain the membrane potential in normal metabolic ranges, triggering the acidification of the rhizosphere (Marschner *et al.* 1986; Jensen and Hauggaard-Nielsen 2003). Taking the soil processes together alongside with lentil's roots metabolism, they can likely result in more Fe and Mn availability for the crop.

On the other hand, lentil Fe fortification has been the focus of breeders in countries where lentil and other pulses are an important component of the daily diet, including Chile (Podder *et al.* 2017). In this context, little information is available regarding toxicities symptoms triggered by Fe and Mn in small grains crops, and there is even more scarce background related to lentils. This is in contrast to what happens with rice, where many studies have been carried out on Fe toxicity (Foy *et al.* 1978; Fageria *et al.* 2002) and significant progress has been made in understanding the molecular mechanisms involved in Fe transport and its toxicity (Dufey *et al.* 2009; Onaga *et al.* 2016).

Thus, the aim of this work was to assess two different fertilization strategies to reduce Fe and Mn toxicity in lentils. To reach this goal, we collected soil samples from a crop land with visible symptoms of Fe and Mn toxicity on lentil leaves and grains, and we carried out a pot experiment to evaluate the effect of lime addition and N fertilization. Subsequently, we measured in the pot experiment plant productivity, root/shoot ratio (R/S), nodule number and Fe and Mn concentration of leaves, roots, and grains. Since the early studies of the Chilean colleagues previously mentioned, as far as we know, there are no international studies about Fe and Mn toxicity in lentils, and we consider that the results of our work could be useful for a broader audience.

Material and Methods

Lentil grains and soil samples were collected from four sites in the Chanco area (Table 1), Maule Region, Chile, since brown and black spots on lentil leaves were observed on these samples. We chemically analyzed the soils and the grains from these sites (Tables 2 and 3), and then decided to carry out a pot experiment with the soil samples from which plants showed toxicity symptoms. Consequently, the pot experiment was conducted with the soil samples from the land of Farmer 3 (F3, Table 2), and they were collected specifically from those areas where the plants showed toxicity symptoms. The site has been cropped with a

lentil-cereal-grassland rotation for at least 20 years around Chanco (35°41'38.8"S 72°30'10.6"W). The samples were taken from the soil surface (0-30 cm), air-dried and sieved to pass 2 mm before the start of the experiment. Soil chemical analyses were measured according to the methods proposed by Sadzawka et al. (2006) for Chilean soils. Briefly, available P was extracted by 0.5 M NaHCO₃ at pH 8.5 and measured by colorimetry by the molybdenum blue method; cations (Ca, K, Mg and Na) were extracted by 1M CH₃COONH₄ at pH 7.0 and measured by atomic absorption spectroscopy (AAS); soil organic matter (SOM) was analyzed with the Walkley and Black oxidation procedure (Nelson and Sommers 1982). Soil pH was measured in water (1:2.5) and electrical conductivity (EC) in the soil saturation extract according to Sadzawka et al. (2006). Fe, Mn, Zn and Cu were extracted by DTPA solution and measured by AAS according to the method proposed by Lindsay and Norvell (1978). Plant available B in soil was extracted with hot CaCl₂ 0.01 M and determined colorimetrically following the azomethine-H method.

The pot experiment was performed with 2.2 kg of soil in 2 L pots with six lentil plants grown during 157 days under greenhouse conditions. The treatments evaluated were three: (a) control (soil as in the field), (b) addition of lime (CaCO₃); and (c) addition of N. Each treatment consisted of six replicates. In the case of lime (CaCO₃) addition, the soil was incubated before the sowing for three weeks until it reached a pH (water, 1:2.5) of 6.6. We used analytical grade CaCO₃ with a purity of 99% (Merck®). For the N treatment, 1 g N was partitioned during the growing period and added together with the irrigation as KNO₃. Basal P fertilization was applied for all treatments (50 mg P kg⁻¹ of soil). All plants were inoculated with 2 mL per plant with a suspension of *Rhizobium leguminosarum* (RizoFix Gel®, BIOGRAM) at rates of 1x10⁹ cfu/mL to promote nodule formation. Pots were irrigated with demineralized water during the experiment to maintain a water content of 75% water-holding capacity.

Shoots were collected at 103 days after sowing (DAS) (first harvest) and at the end of the experiment (157 DAS, second harvest), and they were dried at 65°C until constant weight. Furthermore, in the first harvest, root length was determined by the procedure proposed by Tennant (1975). At the final harvest, shoot, root and grains were collected, dried and milled. Subsequently, plant material was analyzed using a portable Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF) analyzer (Bruker AXS Inc., Billerica – MA, USA) to determine Fe

and Mn concentrations. Ten samples of certified reference material from the Wageningen Evaluating Program for Analytical Laboratories (Dijk 2002) were used to obtain elements concentrations. This calibration consisted of converting K-alpha peak's photon counts into Fe and Mn concentrations (mg kg^{-1}) by Least Squares Regression.

Statistical analysis was performed using Statistica 9.0 (StatSoft, Inc. Tulsa, USA.). The pot experiment had a completely randomized design, with 3 treatments (n was different for each treatment, control=9, N=6, CaCO_3 =8). The addition of lime or N were considered as main factors, and subjected to one-way ANOVA (Quinn and Keough 2002). We also included the grain yield and chemical analyses of grains obtained from the plots cultivated under farmer conditions, which were cultivated in the season 2019 (Table 1). For this, we collected samples of plants from 8 mini-plots randomly distributed of 1 m^2 at the harvest time in each of the farmers' cropland ($n=8$). In this case, the farmer was set as the main factor for the ANOVA analysis. The ANOVA test was followed by a Tukey test at the 5% level of significance to separate the means. Figures were drawn using GraphPad Prism® V8 (GraphPad Software, San Diego, California, USA).

Table 1. Agronomic management conducted by four lentil farmers and their geographical locations in the town of Chanco, Maule region, Central Chile. Lentils were cultivated in the season 2019. In the field of Farmer 3, Fe and Mn toxicities symptoms were visible in lentils. P and K were applied as triple superphosphate and potassium sulfate, respectively, before the sowing and incorporated into the soil through tillage. Farmer 3 applied N as urea after Fe and Mn symptoms became visible on leaves. Before sowing, the seeds were disinfected using the chemical products Mancozeb and Carbendazyme (Anagran® Plus) to prevent fungal infection. *The sowing and threshing dates correspond to the beginning of wintertime and summertime in the southern hemisphere, respectively.

Site and geographic location	*Sowing, harvest and threshing date	Previous crops	Sowing surface (ha)	Nutrient applied (kg ha ⁻¹)			
				N	P	K	S
Farmer 1 35°42'44.6"S 72°31'07.0"W	22 th June	Lentils/Potato/Wheat	0.5	-	30	41.5	18
	7 th December						
Farmer 2 35°42'44.6"S 72°31'07.0"W	25 th December	Wheat	0.9	-	30	41.5	18
	22 th June						
Farmer 3 35°41'38.8"S 72°30'10.6"W	7 th December	Wheat	2.0	46	-	-	-
	24 th June						
Farmer 4 35°40'50.1"S 72°29'12.1"W	7 th December	Wheat	2.0	-	-	-	-
	25 th December						

Table 2. Chemical soil analyses of the fields cultivated with lentils during the 2019-2020 season in the town of Chanco, Maule region, Central Chile. F=Farmer. The extensive experiments designed as F1 and F2 were in the same fields and soils.

	pH	EC dS/ m	SO M -----g 100 g ⁻¹ - -----	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Zn	Cu	B
F1, F2	5.7	0.14	4.8	11.8	15.9	0.92	7.87	2.73	0.14	100.1	16.7	3.42	1.24	0.74
F3	5.7	0.06	3.5	13.0	34.0	0.57	8.26	1.84	0.14	134.3	16.2	3.09	1.94	0.29
F4	5.8	0.05	1.8	1.0	11.0	0.18	5.82	3.14	0.20	90.2	19.0	1.14	1.34	0.12

Results

Lentil grain yields cultivated under farmers' conditions ranged between 1.5 and 2.14 ton ha⁻¹ (Figure 1). The site of more incidence of Fe and Mn toxicity was observed with Farmer 3. Soil Fe availability was higher in the soil of Farmer 3 while Mn availability was similar in all soils under lentil cultivation (Table 2). The mineral composition of lentil grains cultivated by Farmer 3 showed the highest nutrients concentrations among farmers' sites (Table 3). Fe and Mn in grains from Farmer 3 nearly doubled the concentrations obtained in grains of the other farmers, although this was not observed for Zn. Interestingly, B concentration was also higher for the grains cultivated by Farmer 3 than for the other farmers, but only in trends due to the high variability of the data (Table 3).

Table 3. Nutrient concentration of lentil grains cultivated in the Chanco town, Maule region, Central Chile. The *p*-Value was obtained after ANOVA test and the small letters indicate differences among sites according to Tukey test (*p*<0.05). F=Farmer.

Sites	N	P	K	Ca	Mg	B	Cu	Zn	Mn	Fe
	----- g 100 g ⁻¹ -----					-----mg kg ⁻¹ -----				
F1	3.77	0.31b	0.77	0.06b	0.11	5.75	6.75	41.00	15.50 b	49.25 b
F2	3.86	0.34b	0.82	0.05b	0.12	4.75	8.25	45.50	14.00 b	53.50 b
F3	3.86	0.48a	0.86	0.07a b	0.13	13.25	6.75	47.00	29.75 a	97.25 a
F4	3.64	0.30b	0.69	0.10a	0.11	5.75	7.50	44.25	16.50 b	57.75 b
<i>p</i> -Value	0.6	<0.01	0.1	<0.05	0.1	0.1	0.1	0.5	<0.00 1	<0.00 1

Lentils grown in the farmer field with the highest Fe concentration showed toxicity symptoms with black and brown spots on leaves, chlorosis, and defoliation. However, the symptomatology was present in specific areas of this field of farmer 3 and this is why this did not mirror on grain yields, which was among the highest studied (Figure 1).

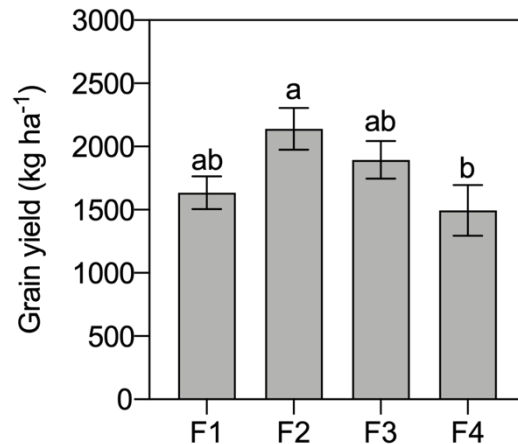


Figure 1. Grain yields in an extensive experimental site in Chanco, Maule region, Central Chile. Small letters indicate differences among sites according to Tukey test ($p < 0.05$). F=Farmer.

In the pot experiment, the dry matter (DM) produced by lentils in the intermediate harvest (103 DAS) was highest in the control plants (Figure 2A). The addition of either N or lime was not mirrored on DM increase in this intermediate harvest stage. Note that the DM is expressed in milligrams (mg) because of the low amount of biomass produced by the plants at this stage. A slight reduction of roots was recorded for plants treated with N. At this stage, the amount of active and inactive nodules was counted. The plants treated with lime showed more nodules than those in the control, while almost no nodules were scored for those plants supplied with N (Figure 2B). The root to shoot (R/S) ratio indicates that the plants grown in the soil with the addition of lime developed relatively more roots compared to the other treatments and that N was not altering the extent of the root system at 103 DAS (Figure 2C). At the end of the experiment (157 DAS), the DM produced was higher in the plants that received N while the lowest DM production was recorded in those plants treated with lime (Figure 3A). Plants grown in the control soil and the soil treated with lime developed lower root DM than those plants grown with N addition. The grain yield also was positively affected by the addition of N being 33% higher than in the control plants. In the case of plants grown in the soil with lime addition, the yield was almost not altered and even it was slightly reduced

in comparison to the yield obtained by the control plants. However, lime addition effectively diminished the number of spotted grains while the addition of N contributed to a significant reduction of spotted grains down to 12.5% while control presented about 37% of spotted grains (Figure 4).

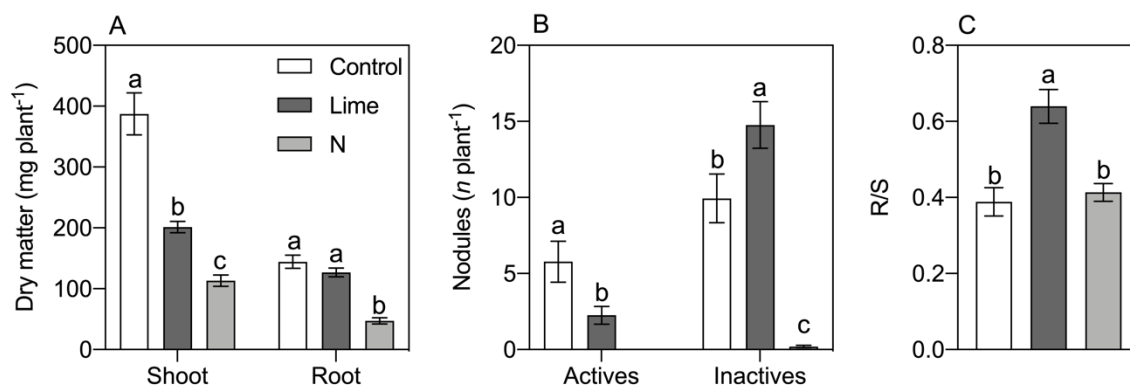


Figure 2. A) Dry matter of shoots and roots produced by lentils grown in pots that were harvested 103 days after sowing, B) number of active and inactive nodules, and C) root to shoot ratio (R/S). Small letters indicate significant differences among treatments after Tukey's test ($p < 0.05$).

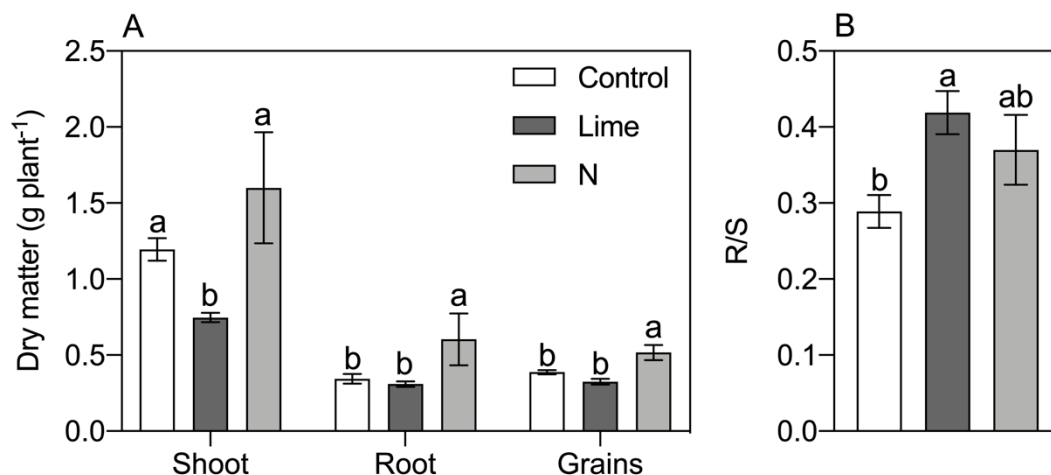


Figure 3. A) Dry matter of shoots, roots and grains produced by lentils grown in pots that were harvested 157 days after sowing and B) root to shoot ratio (R/S). Small letters indicate significant differences among treatments after Tukey's test ($p < 0.05$).

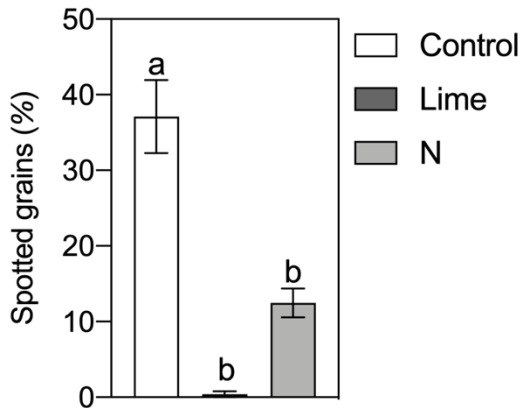


Figure 4. Percentage of spotted grains evaluated in lentils grown in pots depending upon the treatments with no nutrient addition, and lime and N applications. The percentage was calculated in relation to the total number of grains obtained in the respective treatment. Small letters indicate significant differences among treatments after Tukey's test ($p < 0.05$).

At the harvest time, Fe concentrations varied between 550 and 1,200 mg kg⁻¹ in shoots while Mn concentrations oscillated between 65 and 220 mg kg⁻¹ (Figure 5A). In those plants fertilized with N, the Fe and Mn levels in the shoots were lower than in the control plants and those grown in soils treated with lime. In the case of Fe, it was significantly reduced to 50.5% in the plants treated with N relative to the control while the reduction of Mn was significant for plants grown in soils treated with either lime or with N (Figure 5A, bar graph). The reduction of Mn in the plants fertilized with N and lime corresponded roughly to 70% and 32.5%, respectively (Figure 5A, bar graph), compared to the control treatment. Roots exhibited high concentrations of Fe and Mn that were 13 and nine-fold higher than in the shoots, respectively (Figure 5B). In the roots of those plants fertilized with N, the Fe and Mn concentrations were significantly higher than in the other two treatments, showing an increase of around 27% compared to the control plants. The increase of Mn concentration in the roots of plants treated with N was also significantly different relative to the concentration of the control plants. In the plants grown in the soil treated with lime, the Fe and Mn concentrations of roots did not differ from those encountered in the control plants. In the grains, Fe concentration was reduced in plants treated with lime and N although only as a trend. However, a significant decrease was recorded on Mn concentration in the grains of plants treated with N. In general, Fe and Mn concentrations in grains were lower than in shoots and roots.

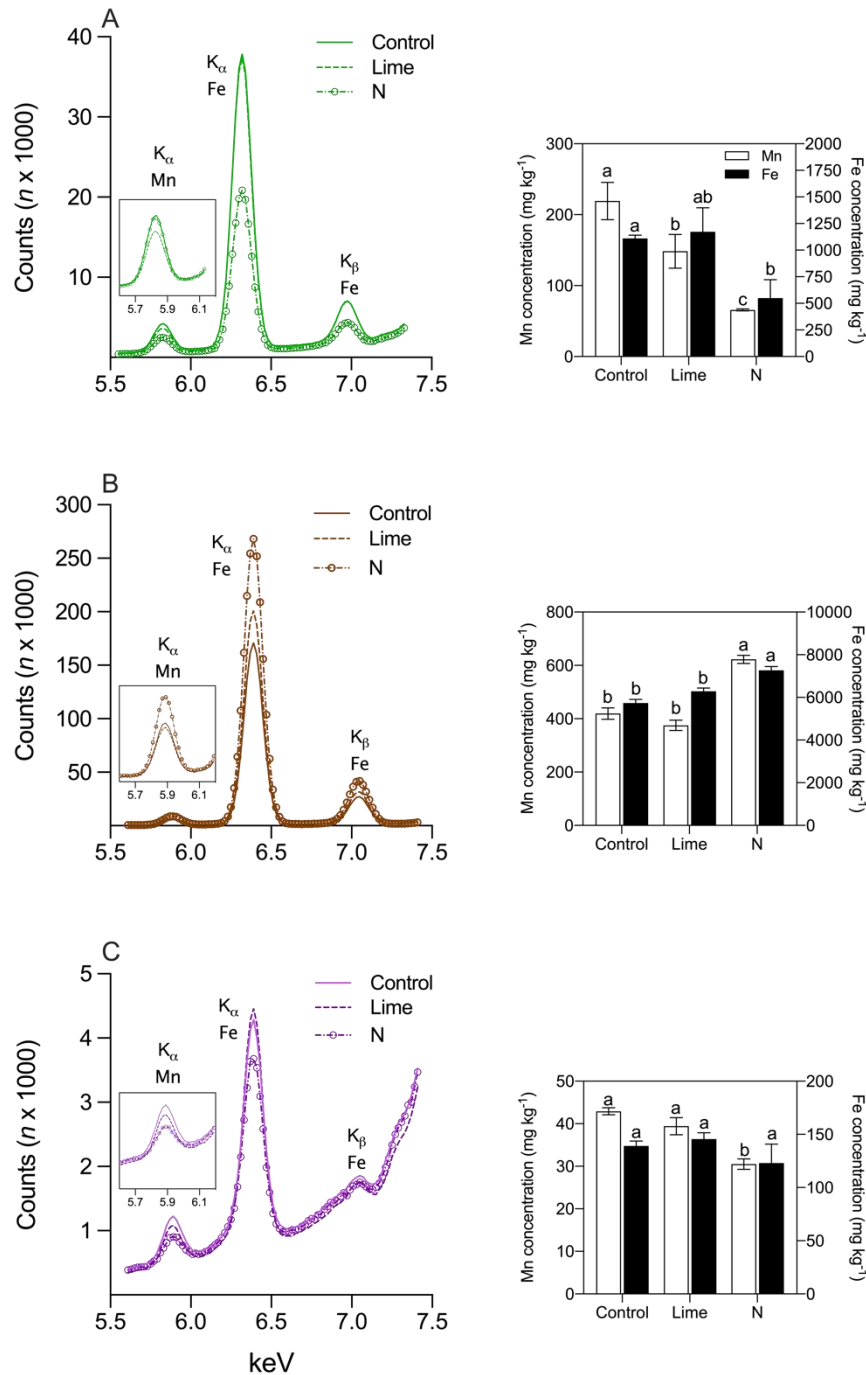


Figure 5. Fe and Mn concentrations in lentils grown in pots after 157 days after sowing. Curves show the X-Ray Fluorescence (XRF) spectra for Fe (K_{α} and K_{β}) and Mn (K_{α}) in: A) shoots; B) roots, and; C) grains. The bar graphs beside the curves indicate the calculated concentrations of Fe and Mn derived from the fluorescence spectra for each plant organ. Small letters in the concentration graphs indicate significant differences among treatments after Tukey's test ($p < 0.05$).

Control plants suffered Fe and Mn toxicities showing brown and black spots in basal leaves, this symptomatology progressed until the complete fall of leaves (Figure 6A and B). The grains of control plants developed brown spots in the cuticle, and the grains looked sucked in some cases (Figure 6C, below).



Figure 6. Lentil plants grown in pots with toxicity symptoms of Fe and Mn toxicities. A) Brown and black spots in basal leaves and normal young leaves at the tip without symptomatology. B) Complete defoliation of basal leaves and chlorotic progression in remanent leaves showing symptomatology of Fe and Mn toxicities. C) Normal healthy lentil seeds (above) and spotted seeds with high Fe and Mn concentrations (below).

Discussion

Lentil production is negatively affected in Mediterranean areas where alkaline and calcareous soil conditions severely limit the availability of micronutrients (Mahmoudi *et al.* 2005; Gupta *et al.* 2008). In Chile, the lentil production area is concentrated in soils that vary in pH from slightly alkaline to slightly acidic conditions, although the main production zone is located where the soils have pH values below 7 (Rosales-Rodríguez *et al.* 2019). For this reason, lentils grown in the Maule region rarely show deficiency symptoms associated with low Fe and Mn availability. However, soil properties in combination with unfavorable weather events trigger anaerobic soil conditions that promote high solubility of metals. This is related to poor aeration conditions caused by soil compaction or heavy textures (Fageria *et al.* 2002). Soil pH and redox potential are the main factors affecting the metal solubility in soils, although the redox potential plays a major role when the pH is in a narrow range or at a constant value, especially for Fe (Lindsay 1979; Cao *et al.* 2001). Similar effects due to

reduction conditions were reported in a Chilean soil in which lentils showed symptoms of Fe and Mn toxicity (Ciudad and Ite 1994). In this soil, the change to a more negative redox potential increased in several folds the solubility of Fe and Mn, suggesting that the reductive conditions are likely responsible for the Fe and Mn toxicity levels found in lentils under field conditions. We collected soil samples from fields that were chemically analyzed (Table 2), after harvest and after the rainfall season, thus it is probable that the soil was aerated explaining the normal levels of Fe and Mn soil concentrations. In the field of Farmer 3, grains with toxicity symptoms attributable to Fe and Mn concentrations were analyzed. In this case, the grain yield was amongst the highest (Figure 1), but the commercial quality of the grains was negatively affected. The concentration of both elements in the grains of the field of Farmer 3 almost doubled the concentrations of the grains from the other farmers. In comparison, normal Fe and Mn concentrations of lentil grains range from 75.6 to 100 and 12.2 to 14.8 mg kg⁻¹ (Ray *et al.* 2014), respectively, whose values were obtained from lentils cultivated in different sites in southern Saskatchewan, Canada. Although Fe concentration numbers for lentil grains from Farmer 3 is in the normal range, grain Mn concentration is almost double than the mean concentration reported by Ray *et al.* (2014), which could explain the toxicity symptoms observed in the field of Farmer 3.

Based on the symptoms and the Fe and Mn concentrations recorded from Farmer 3, soil in those areas were collected with the more pronounced toxicities in the grains, and an experiment was carried out with lentil plants grown in pots. The DM produced by plants was increased by the addition of N but not by the addition of lime (Figure 3). Nodules in the plants treated with N were almost abolished while the amount of nodule in plants treated with lime increased. The inhibition of nodule formation and N₂ fixation activity has been described by several authors (Streeter 1988; Cabeza *et al.* 2014; Schulze *et al.* 2020). The inhibition of nodule formation and the cessation of N₂ fixation is normally found in legumes fertilized with N since N uptake is energetically favored in comparison to the more expensive N₂ fixation process (Schilling *et al.* 2006). Although initially, the R/S ratio was lower for plants treated with N, it increased at the end of the growth period and it was higher relative to the other two treatments (i.e., control and lime treatments), indicating that a more extended root system was developed in the N treatment. The same was observable for the shoot DM and the grain yield attained. The increase of shoot DM could help to dilute the Fe and Mn

concentrations absorbed by the plants, and at the same time, the more extended root system could contribute to store Fe and Mn (Figures 3 and 5). The high levels of Mn have been also associated to indole acetic acid (IAA) degradation in other species, which can impact plant development (Foy *et al.* 1978). In fact, control plants were smaller than those grown with N addition.

Since not specialized organs in lentils have been characterized so far for metal accumulation as in other species, roots can help to store the excess of metals absorbed by the plant and buffer the Fe and Mn concentrations of the shoot. In case of overload of Fe due to unfavorable soil conditions, plants can store the Fe excess in shoots and roots by the synthesis of phytoferritin, which is localized in the cell plastids that store Fe and reduce the oxidative stress (Hell and Stephan 2003). In other plant species, metal accumulation occurs mainly in specialized cell compartments or around organs such as in the base of trichomes in sunflower (*Helianthus annuus* L.), which is known to be a resistant species to Mn toxicity (Blamey *et al.* 1986). In addition, it has been described a transient accumulation of Mn in the roots of white lupins (*Lupinus albus*), which is rapidly mobilized to the shoots via xylem and subsequently stored in the shoots (Page *et al.* 2006). In lentils, Mn and Fe accumulation in the shoot resulted in dark spots in basal leaves, progressing to chlorotic and eventually turning them necrotic until complete defoliation (Figure 6), which agrees with the observations made by Horst (1983) in cowpea (*Vigna unguiculata*). In cowpeas leaves, the excess of Mn is visualized as brown or black spots as the result of higher Mn concentration in these areas (Blamey *et al.* 2018). Thus, it is likely that high Mn and/or Fe concentrations in lentils are localized in the vacuoles of leaves cells as it has been observed for common beans (González and Lynch 1999). More recently, vacuolar metal transporters have been indicated to play a central role in the homeostasis of Mn in plants, either by sequestering the excess of this metal or by retrieving from the vacuole when deficiency emerges (Shigaki *et al.* 2003; Lanquar *et al.* 2010). The N₂ fixation activity by rhizobia can reduce the pH values in the rhizosphere and thereby increases the solubility of micronutrients (Marschner and Römheld 1983; Marschner *et al.* 1986). It seems likely that legumes that depend solely on N₂ fixation are more sensitive to high Mn availability that affects plant growth, nodule number and N₂ fixation (Döbereiner 1966; Bordeleau and Prévost 1994). This is probably connected with the fine regulation of nodule activity and N demand, which results in a

reduction of N₂ fixation when a stress emerges and it disturbs the normal plant growth (Cabeza *et al.* 2015).

To reduce the incidence of this mineral disorder, lentils should be sown in well-drained soils and be fertilized with moderate N doses at the sowing time to ensure the establishment of the plants, or by adjusting the sowing time after the rainy season. For the latter, it is necessary to advance in breeding programs to produce short-cycle lentil varieties that can achieve high yields in shorter growing periods. Progress must also be made in understanding the genetic and the molecular mechanisms of Fe and Mn transport and their storage in roots and leaves of lentils, which could open new paths for increasing micronutrient concentrations of seeds and for increasing their yields.

Conclusions

Lentils that rely solely on N₂ fixation for their N nutrition are more likely to suffer Fe and Mn toxicity, thus this work highlights the importance of using N fertilization to increase the DM production of lentils. This would reduce Fe and Mn concentrations on leaves to a level that possibly is under the threshold that causes toxicity in plant tissues. Furthermore, the increase of Fe and Mn in the roots is likely connected to the reduction of these metals on the shoots. Finally, since reduction conditions are more prevalent during the lentil growing season in the type of soil studied in this work, the lime addition to augment soil pH value has little effect if soil is not managed to increase its aeration.

Funding information:

This work was supported by ANID Chile, FONDECYT Grant No. 1201050 and by FIA Grant No. PYT-2017-0490.

Declaration of Competing Interest

The authors declare no competing interests.

Availability of data

The data that support this study will be shared upon reasonable request to the corresponding author.

References

- Blamey FPC, Joyce DC, Edwards DG, Asher CJ (1986) Role of trichomes in sunflower tolerance to manganese toxicity. *Plant and Soil* **91**, 171–180. doi:10.1007/BF02181785.
- Blamey FPC, Paterson DJ, Walsh A, Afshar N, McKenna BA, Cheng M, Tang C, Horst WJ, Menzies NW, Kopittke PM (2018) Time-resolved X-ray fluorescence analysis of element distribution and concentration in living plants: An example using manganese toxicity in cowpea leaves. *Environmental and Experimental Botany* **156**, 151–160. doi:10.1016/j.envexpbot.2018.09.002.
- Bordeleau LM, Prévost D (1994) Nodulation and nitrogen fixation in extreme environments. *Plant and Soil* **161**, 115–125. doi:10.1007/BF02183092.
- Cabeza RA, Koester B, Liese R, Lingner A, Baumgarten V, Dirks J, Salinas-Riester G, Pommerenke C, Dittert K, Schulze J (2014) An RNA sequencing transcriptome analysis reveals novel insights into molecular aspects of the nitrate impact on the nodule activity of *Medicago truncatula*. *Plant Physiology* **164**, 400–411. doi:10.1104/pp.113.228312.
- Cabeza RA, Liese R, Fischinger SA, Sulieman S, Avenhaus U, Lingner A, Hein H, Koester B, Baumgarten V, Dittert K, Schulze J (2015) Long-term non-invasive and continuous measurements of legume nodule activity. *The Plant Journal* **81**, 637–648. doi:10.1111/tpj.12751.
- Cao X, Chen Y, Wang X, Deng X (2001) Effects of redox potential and pH value on the release of rare earth elements from soil. *Chemosphere* **44**, 655–661. doi:10.1016/S0045-6535(00)00492-6.
- Casanova M, Salazar O, Seguel O, Luzio W (2013) ‘The Soils of Chile.’ (Springer Netherlands) doi:10.1007/978-94-007-5949-7.
- Ciudad C, Ite R (1994) Disponibilidad de hierro y manganeso en suelos con aireación restringida. *Agricultura Técnica* **54**, 199–203.

- Dijk D van (2002) Wageningen evaluating programmes for analytical laboratories (WEPAL): a world of experience. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **33**, 2457–2465. doi:10.1081/CSS-120014460.
- Döbereiner J (1966) Manganese toxicity effects on nodulation and nitrogen fixation of beans (*Phaseolus vulgaris* L.), in acid soils. *Plant and Soil* **24**, 153–166. doi:10.1007/BF01373081.
- Dufey I, Hakizimana P, Draye X, Lutts S, Bertin P (2009) QTL mapping for biomass and physiological parameters linked to resistance mechanisms to ferrous iron toxicity in rice. *Euphytica* **167**, 143–160. doi:10.1007/s10681-008-9870-7.
- Fageria NK, Baligar VC, Clark RB (2002) Micronutrients in crop production (DL Sparks, Ed.). *Advances in Agronomy* **77**, 185–268. doi:10.1016/S0065-2113(02)77015-6.
- FAO, ITPS (2015) ‘Status of the World’s Soil Resources: Main Report.’ (FAO: Rome, Italy) <http://www.fao.org/documents/card/es/c/c6814873-efc3-41db-b7d3-2081a10ede50/>.
- Foy CD, Chaney RL, White MC (1978) The physiology of metal toxicity in plants. *Annual Review of Plant Physiology* **29**, 511–566. doi:10.1146/annurev.pp.29.060178.002455.
- France A, Tay J (1986a) La roña o marea negra de la lenteja. *Investigación y Progreso Agropecuario (IPA) Quilamapu* **29**, 18–21.
- France A, Tay J (1986b) Problema nutricional en lentejas (*Lens culinaris* Med.) asociado a altos contenidos de manganeso y hierro. *Agricultura Técnica* **46**, 379–383.
- González A, Lynch JP (1999) Subcellular and tissue Mn compartmentation in bean leaves under Mn toxicity stress. *Functional Plant Biology* **26**, 811–822. doi:10.1071/pp99030.
- Gregory PJ (1998) Alternative crops for duplex soils: growth and water use of some cereal, legume, and oilseed crops, and pastures. *Australian Journal of Agricultural Research* **49**, 21–32. doi:10.1071/a97053.
- Gupta UC, Wu K, Liang S (2008) Micronutrients in soils, crops, and livestock. *Earth Science*

- Frontiers* **15**, 110–125. doi:10.1016/S1872-5791(09)60003-8.
- Havlin J, Beaton JD, Tisdale SL, Nelson WL (2005) ‘Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management.’ (Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, NJ)
- Hell R, Stephan UW (2003) Iron uptake, trafficking and homeostasis in plants. *Planta* **216**, 541–551. doi:10.1007/s00425-002-0920-4.
- Horst WJ (1983) Factors responsible for genotypic manganese tolerance in cowpea (*Vigna unguiculata*). *Plant and Soil* **72**, 213–218. doi:10.1007/BF02181959.
- Hue NV (1988) A possible mechanism for manganese phytotoxicity in Hawaii soils amended with a low-manganese sewage sludge. *Journal of Environmental Quality* **17**, 473–479. doi:https://doi.org/10.2134/jeq1988.00472425001700030022x.
- Husson O (2013) Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy. *Plant and Soil* **362**, 389–417. doi:10.1007/s11104-012-1429-7.
- Jensen ES, Hauggaard-Nielsen H (2003) How can increased use of biological N₂ fixation in agriculture benefit the environment? *Plant and Soil* **252**, 177–186. doi:10.1023/A:1024189029226.
- Lanquar V, Ramos MS, Lelièvre F, Barbier-Brygoo H, Krieger-Liszakay A, Krämer U, Thomine S (2010) Export of vacuolar manganese by AtNRAMP3 and AtNRAMP4 is required for optimal photosynthesis and growth under manganese deficiency. *Plant Physiology* **152**, 1986–1999. doi:10.1104/pp.109.150946.
- Lindsay W (1979) ‘Chemical equilibria in soils.’ (Wiley-Interscience: NY, USA) <https://doi.org/10.1346/CCMN.1980.0280411>.
- Lindsay WL, Norvell WA (1978) Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal* **42**, 421–428. doi:10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x.

- Mahmoudi H, Ksouri R, Gharsalli M, Lachaâl M (2005) Differences in responses to iron deficiency between two legumes: lentil (*Lens culinaris*) and chickpea (*Cicer arietinum*). *Journal of Plant Physiology* **162**, 1237–1245. doi:10.1016/j.jplph.2004.12.009.
- Marschner P (Ed) (2012) ‘Marschner’s mineral nutrition of higher plants.’ (Academic Press)
- Marschner H, Römheld V (1983) In vivo measurement of root-induced pH changes at the soil-root interface: effect of plant species and nitrogen source. *Zeitschrift für Pflanzenphysiologie* **111**, 241–251. doi:10.1016/S0044-328X(83)80083-X.
- Marschner H, Römheld V, Horst WJ, Martin P (1986) Root-induced changes in the rhizosphere: Importance for the mineral nutrition of plants. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **149**, 441–456. doi:https://doi.org/10.1002/jpln.19861490408.
- Morrissey J, Guerinot ML (2009) Iron uptake and transport in plants: the good, the bad, and the ionome. *Chemical Reviews* **109**, 4553–4567. doi:10.1021/cr900112r.
- Nelson D, Sommers L (1982) Total carbon, organic carbon and organic matter. ‘Methods of soil analysis’. (Eds A Page, R Miller, D Keeney) pp. 539–580. (ASA, SSSA, CSSA: Madison, WI)
- Onaga G, Dramé KN, Ismail AM, Onaga G, Dramé KN, Ismail AM (2016) Understanding the regulation of iron nutrition: can it contribute to improving iron toxicity tolerance in rice? *Functional Plant Biology* **43**, 709–726. doi:10.1071/FP15305.
- Ovalle C, Del Pozo A, Avendaño J, Aronson J (1997) Características fenológicas y productivas de treinta y cuatro accesiones de hualputra (*Medicago polymorpha*) colectadas en la zona mediterránea de Chile. <https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/39046>.
- Page V, Weisskopf L, Feller U (2006) Heavy metals in white lupin: uptake, root-to-shoot transfer and redistribution within the plant. *New Phytologist* **171**, 329–341. doi:https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01756.x.

- Pala M, Ryan J, Zhang H, Singh M, Harris HC (2007) Water-use efficiency of wheat-based rotation systems in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management* **93**, 136–144. doi:10.1016/j.agwat.2007.07.001.
- Peñaloza E, Tay U J, France I A (2007) Calpún-INIA, cultivar de lenteja (*Lens culinaris* Medik.) de grano grande y resistente a roya. *Agricultura Técnica* **67**, 68–71. doi:10.4067/S0365-28072007000100008.
- Peoples MB, Bowman AM, Gault RR, Herridge DF, McCallum MH, McCormick KM, Norton RM, Rochester IJ, Scammell GJ, Schwenke GD (2001) Factors regulating the contributions of fixed nitrogen by pasture and crop legumes to different farming systems of eastern Australia. *Plant and Soil* **228**, 29–41. doi:10.1023/A:1004799703040.
- Podder R, Tar'an B, Tyler RT, Henry CJ, DellaValle DM, Vandenberg A (2017) Iron fortification of lentil (*Lens culinaris* Medik.) to address iron deficiency. *Nutrients* **9**, 863. doi:10.3390/nu9080863.
- Quinn GP, Keough MJ (2002) 'Experimental design and data analysis for biologists.' (Cambridge University Press: Cambridge)
- Rashid DA, Ryan J (2004) Micronutrient Constraints to Crop Production in Soils with Mediterranean-type Characteristics: A Review. *Journal of Plant Nutrition* **27**, 959–975. doi:10.1081/PLN-120037530.
- Ray H, Bett K, Tar'an B, Vandenberg A, Thavarajah D, Warkentin T (2014) Mineral micronutrient content of cultivars of field pea, chickpea, common bean, and lentil grown in Saskatchewan, Canada. *Crop Science* **54**, 1698–1708. doi:https://doi.org/10.2135/cropsci2013.08.0568.
- Rosales-Rodríguez JA, Esquivel-Segura EA, Acevedo-Tapia MA, González-Ortega M, Cartes-Rodríguez E (2019) Pre and post-fire situation, of an ecosystem of the Roble-Hualo forest type, Maule region, Chile. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* **16**, 55–68. doi:10.18845/rfmk.v16i38.3997.

- Sadzawka A, Carrasco MA, Gez R, Mora M de la L, Flores H, Neaman A (2006) 'Metodos de análisisrecomendados para los suelos de Chile. Revision 2006.' (Santiago de Chile) <https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/8541>.
- Schilling G, Adgo E, Schulze J (2006) Carbon costs of nitrate reduction in broad bean (*Vicia faba* L.) and pea (*Pisum sativum* L.) plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **169**, 691–698. doi:10.1002/jpln.200620609.
- Schulze J, Liese R, Ballesteros G, Casieri L, Salinas G, Cabeza RA (2020) Ammonium acts systemically while nitrate exerts an additional local effect on *Medicago truncatula* nodules. *Plant Science* **292**, 110383. doi:10.1016/j.plantsci.2019.110383.
- Sen Gupta D, McPhee K, Kumar S (2017) Development of molecular markers for iron metabolism related genes in lentil and their expression analysis under excess iron stress. *Frontiers in Plant Science* **8**,. doi:10.3389/fpls.2017.00579.
- Sepulveda P, Baherle P (1986) Marea negra en lenteja. *Investigación y Progreso Agropecuario (IPA) La Platina* **36**, 20–23.
- Sepúlveda-Caamaño M, Gerding M, Vargas M, Moya-Elizondo E, Oyarzúa P, Campos J (2018) Lentil (*Lens culinaris* L.) growth promoting rhizobacteria and their effect on nodulation in coinoculation with rhizobia. *Archives of Agronomy and Soil Science* **64**, 244–256. doi:10.1080/03650340.2017.1342034.
- Shigaki T, Pittman JK, Hirschi KD (2003) Manganese specificity determinants in the Arabidopsis metal/H⁺ antiporter CAX2. *The Journal of Biological Chemistry* **278**, 6610–6617. doi:10.1074/jbc.M209952200.
- Streeter J (1988) Inhibition of legume nodule formation and N₂ fixation by nitrate. *Critical Reviews in Plant Sciences* **7**, 1–23. doi:10.1080/07352688809382257.
- Tay J, France A, Paredes M (2001) Súper Araucana-INIA: una nueva variedad de lenteja (*Lens culinaris* Med.) chilena de grano grande. *Agricultura Técnica* **61**, 385–389. doi:10.4067/S0365-28072001000300013.

Tennant D (1975) A test of a modified line intersect method of estimating root length. *Journal of Ecology* 995–1001.

Zuo Y, Zhang F (2011) Soil and crop management strategies to prevent iron deficiency in crops. *Plant and Soil* **339**, 83–95. doi:10.1007/s11104-010-0566-0.

CAPÍTULO III

Tórtola bean: a study case of a “hotspot” crop grown in the Maule Region of Chile

A. R. Schwember¹, L.A. Muñoz², R. Amigo³, A.M. Méndez-Espinoza³, G. Tapia⁴, B. Carrasco⁵, R. A. Cabeza³

¹Pontificia Universidad Católica de Chile. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Casilla 306-22, Santiago, Chile.

²Universidad Central de Chile. Escuela de Ingeniería, Santiago 8330601, Chile.

³Universidad de Talca. Facultad de Ciencias Agrarias, Talca, Chile.

⁴Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Centro Regional de Investigación Quilamapu, Casilla 426, Chillán, Chile.

⁵Scientific Director at Centro de Estudios en Alimentos Procesados (CEAP), Av. Lircay s/n, Talca 3460000, Chile

Corresponding author: rcabeza@utalca.cl

Abstract. The Tórtola beans are the most consumed in Chile. The main objective of this work was to study the yield potentials of four common bean cultivars through agronomic management improvements, as well as their morphological and nutritional aspects evaluated in the Mediterranean Maule Region of Chile. For this purpose, nitrogen (N) fertilization doses ranging between 46 and 138 kg ha⁻¹ and water applied in the whole season between 2,000 and 9,000 m³ ha⁻¹ using different irrigation systems were tested in two consecutive years (the 2018 and 2019 experiments). Overall, grain yields of up to 5.4 ton of grains ha⁻¹ were reached in this study, standing out the Tórtola bean cultivar ‘Zorzal’, which genetic potential is particularly favored in this part of Chile. Diminishing both N fertilization doses of 90 kg ha⁻¹ and 4,800 m³ of water ha⁻¹ by drip irrigation were sufficient to generate high yields (4 ton of grains ha⁻¹). By measuring canopy coverage, we recommend a plant density of 280,000 plant ha⁻¹ versus the current plant density of about 180,000 plants ha⁻¹. Mineral concentration of grains was significantly affected by the amount of water applied and by the cultivars studied, although the N level did not affect the nutrient concentration itself. The deficit irrigation treatment resulted in an increase of Zn, independently of cultivar and N level. Physical and morphological properties of grains were not affected by irrigation or by N dose, only by the cultivars studied. Finally, Tórtola bean production in the Maule Region is an

important opportunity for Chile due to the high grain yields obtained, and for developing it further from a scientific and technical standpoint, which will ultimately benefit the farmers using more sustainable agricultural systems in the future.

1. Introduction

The common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is an annual dicotyledenous species belonging to the Fabaceae family also known as legumes, which integrates the genus *Phaseolus* that consists of over 70 species, all of them from the Americas, and five domesticated taxa, *P. vulgaris* L., *P. lunatus* L., *P. acutifolius* A. Gray., *P. coccineus* L. and *P. dumosus* Macfady, which have distinct geographical distributions, life histories and reproductive systems (Maréchal et al., 1978; Schwember et al., 2017). Common bean mainly corresponds to an autogamous species with a chromosomal constitution of 11 chromosomes ($2n = 2x = 22$) (Mok and Mok 1976; Singh 2005), and 473 Mbp of DNA sequence have been assembled (Phytozome.net 2014; Schmutz et al. 2014). This species is important due to its high genetic variability in characteristics such as plant size, growth habit, flower color, pod and seed color, among others. Its main presentation consumption habit corresponds to dry grain, but also in horticultural form such as green or green-shelled beans (Guglielmetti et al., 1977).

Globally, a total planted surface of 34.5 million hectares was estimated for 2018, with Asia, having the highest proportion with approximately 19 million hectares followed by Africa and America with 7.7 and 7.3 million hectares, respectively, being Brazil and Mexico the main countries responsible for production in America. If we analyze the bean production in South America, Chile is ranked ninth in terms of production, but with the highest yields (1.76 ton/ha) in the continent (FAOSTAT, 2020). Sing et al. (1991) identified six different bean races in Latin America, in which three (Durango, Jalisco and Mesoamerica) corresponded to Mesoamerica and the other three (Nueva Granada, Peru and Chile) to Andean regions of South America. Interestingly, one recent study shows that race Chile may be the original domesticated Andean common bean grown in the southern Andes before the replacement by races Peru or Nueva Granada (Trucchi et al., 2021). Chilean bean production stands out due to the use of improved cultivars from naturalized or endemic classes, destined only for internal consumption. Its uses can be in fresh state (green bean and green-shelled bean) or as dry grain. Within the country, the main commercial classes produced and consumed

correspond to the 'Tórtola' type for dry grain and 'Coscorrón' type as green-shelled bean. Both classes come from the Andean gene pool belonging to the race Chile (Paredes et al., 1998; Bascur and Tay, 2005), and the Tórtola bean is the most consumed in Chile (Pinheiro et al., 2018).

As Chile is identified as a sub-center of genetic diversity for the species, the country has the potential and the need to characterize, conserve and study the germplasm. However, unlike other Latin American regions, the existence of wild beans has not been evidenced in the country yet (Paredes et al., 2010; Becerra et al., 2011), which is an important factor to consider in the national genetic improvement of the species. However, Johns et al. (1997) reported that common bean landraces from Chile are a phenotypically diverse group whose relationship to the two main gene pools (Mesoamerican and Andean) was largely undocumented. In this study, they concluded that the 69 Chilean landraces could be readily categorized into the Mesoamerican and Andean gene pools by using RAPDs, and that the morphological traits studied were less effective at classification. However, the most probable geographic origin of the Chilean common bean germplasm is Andean because of its closer genetic relationship with the wild accessions from this germplasm (Becerra et al., 2011). In addition, research on the race Chile shows the presence of a narrow genetic base in this germplasm (Paredes and Gepts, 1995). INIA maintains the largest Chilean bean germplasm collection containing 1,106 accessions that were evaluated using different morphological traits and 24.7% of these accessions associated to traditional Chilean bean ecotypes (Bascur and Tay, 2005). In addition, this Chilean collection of bean germplasm also contains individuals of races from Nueva Granada, Durango, Peru, Mesoamerica and Jalisco (Paredes et al., 2010), who reported that 7.7% of the total accessions belonged to the Tórtola class.

Water use efficiency (WUE) is currently one of the most relevant topics in sustainable crop production systems (Bedoussac et al., 2015), being important to gain insight into the various mechanisms within a plant to cope with drought conditions together with the relationships between bean yields and water requirements. In this context, it has been reported that Tórtola bean has rapid adaptation to reductions in water potential compared to other national commercial classes due to its high elasticity of cell walls, being 'Orfeo-INIA' the best adapted to water stress (Martinez et al., 2007). In addition, cultivars well adapted to drought

have shown reductions of up to 50% of their water demand grown in proper soil conditions, and they are not significantly affected in their productive performance (Satriani et al., 2015). Furthermore, comparative studies of water stress tolerance between Andean and Mesoamerican races have revealed that intergenic species show higher tolerance than those observed in individual races (Teran and Singh, 2002). More recently, Cortés and Blair (2018) reported that adaption to drought has been under natural divergent selection, so drought tolerance may be beneficial under dry environments but harmful under humid conditions, and the identification of genomic signatures of adaptation are valuable for germplasm characterization, for improving future marker-assisted selection and common bean breeding.

Nitrogen (N) fertilization is another relevant agronomic practice to consider in bean cultivation since this species requires to be fertilized to obtain high yields unlike other legumes (Tsai et al., 1993). In this study, at high fertility and the highest N rate (120 mg kg⁻¹ soil), the stimulatory effect of N fertilizer on N₂ fixation was still observed, increasing the amounts of N₂ fixed from 88 up to 375 mg N plant⁻¹. Despite the promising effects of inoculations with azospirillum and rhizobia as an alternative to N fertilizers (Dardanelli et al., 2008; Bettiol et al., 2020), beans have low N₂ fixation capacity compare to other legumes such as soybeans (Isoi and Yoshida, 1991). Some promising studies have identified highly efficient N fixing lines (Wilker et al., 2019), which deserve to be studied in detail using Chilean bean cultivars.

At the nutritional level, beans play a fundamental role in the world diet of people because it represents one of the most important sources of protein, and to a lesser extent, of vitamins and minerals, highlighting its low-fat content (Singh and Pratap, 2011). Because of these properties, bean has been attributed health benefits as a cholesterol level reducer, contributing to the decrease in obesity and diabetes in the population (Howarth et al., 2001; Helmstädter, 2010), and benefits in cancer prevention (Dinelli et al., 2006). Bean seeds normally possess between 20 and 25% of proteins, mainly constituted by the storage protein phaseolin (Ma and Bliss, 1978; Broughton et al., 2003). In this sense, particular studies focusing on the analysis of protein content between races of beans have been conducted, and it has been concluded that they do not show significant differences (Paredes et al., 2009), but they have lower levels compared to wild beans (Guzman-Maldonado et al., 2000). Along with this, the

Chile race has a proper content of protein, Fe and Zn, and the 'Tórtola' class contains a small non-significant superiority compared to values obtained in the commercial class 'Coscorrón' (Zacarias et al., 1991; Paredes et al., 2009). Among the main attributes demanded by consumers in culinary preferences, soft cuticles when cooked are desirable for dry grain, delivering clear broths at the time of cooking, unique colorations and uniform cooking of the grains. This is why the sale of grains of individual cultivars in Chile is prioritized over the mixture of cultivars (Bascur and Tay, 2005; Tay et al., 2012).

This article aims to investigate the yield potentials of four common bean cultivars through agronomic management enhancements, particularly by decreasing N fertilization and total applied water through the season, and their morphological and nutritional characteristics analyzed in the Mediterranean Maule Region of Chile.

2. Materials and Methods

Experimental site, plant material and growing conditions

A first experiment was carried out to evaluate the agronomic performance of four Chilean bean cultivars: a black-colored grain bean type ('Curi'), a white-colored grain bean type ('Blanco Español') and two Tórtola grey-colored grain beans ('Torcaza' y 'Zorzal'). The four cultivars were bred by the Legumes Breeding Program of INIA. In this experiment, water and N doses were evaluated on grain yields and other parameters described in the next sections.

The experiment was conducted in the spring-summer seasons of 2018-2019 (hereinafter named the 2018 experiment) in collaboration with a local farmer from Curepto town, Maule Region, Chile. The field is located at 34°59'24" S 72°1'1" W at an altitude of 16 m.a.s.l., and it is positioned 15 km away from the coastal line. The soil of the experiment is classified as an Inceptisol according to the Soil Staff Survey (Soil Survey Staff, 2014), occupying alluvial plains on the banks of the Mataquito River.

The four bean cultivars were tested under two water regimes: 1) standard irrigation, 9 water applications with a total of 5,400 m³ ha⁻¹ in the whole season, and; 2) deficit irrigation, 7 water applications with a final volume of 4,200 m³ ha⁻¹. The water was supplied using drip irrigation tapes. In each irrigation plot, two N fertilization levels were established: 120 and

90 kg N ha⁻¹, applied as urea. The four bean cultivars were sown on November 11, 2018, with 7 cm within the row and a spacing between rows of 75 cm, resulting in 180,000 plants per hectare. This first experiment was established in 12 m² plots (3 m width x 4 m length), with four replicates per treatment. The experimental design was nested inside the irrigation plot and then blocked (4 blocks), with each block containing one replicate of the cultivars grow at the two N levels. A basal fertilization was applied in the whole experimental site with 300 kg ha⁻¹ of triple super phosphate (46% P₂O₅) and 200 kg ha⁻¹ of potassium chloride (60% K₂O). Fertilizers were incorporated with a disc harrow before sowing. Weeds were controlled with the application of S-metolachlor (2880 ml a.i. ha⁻¹) and trifluralin (480 ml a.i. ha⁻¹), both products applied at the same time as pre-emergence herbicides, and manual control as post-emergent weed control management. Harvest of the plots was carried out manually on March 5, 2019, and beans were separated in the laboratory to score grain parameters such as weight and percentage of defective grains.

In 2019-2020 (hereinafter named the 2019 experiment), a second experiment was carried out in the same location as previously described, and the main goal was to compare at field scale the agronomic recommendations derived from the first experiment with the actual farmer management practices. Thus, an area of 2,500 m² was sown on October 28, 2019, with the Tórtola cultivar 'Zorzal' in the same location used for the first experiment, and following the agronomic practices used by the farmer Mr. Héctor Farias (Farmer 1, soil preparation, basal P and K fertilization and weed management were the same as previously pointed out). Farmer 1 established his crop beside the demonstration plot (DP) although the water applied, and N dose differed between them. Farmer 1 applied a total N dose of 130 kg N ha⁻¹ as urea while the DP was fertilized with a dose of 90 kg N ha⁻¹. Regarding the amount of water applied, Farmer 1 used a total amount of 9,000 m³ ha⁻¹ by furrow irrigation system while 4,800 m³ ha⁻¹ were applied in the DP by using drip irrigation tapes (Table 1). For this experiment, grain yield (GY) and harvest index (HI) were compared to those achieved by Farmer 1 and by other three farmers (Farmer 2: Mr. Héctor Farias [for convenience we labelled Farmer 1 and Farmer 2, although it is the same farmer but with two different fields], Farmer 3: Mr. Manuel Gajardo, and Farmer 4: Mr. Manuel Porra), and they were compared to those obtained in the demonstration plot (DP). Farmers 2, 3 and 4 used similar agronomic practices than farmer 1 for soil preparation, basal fertilization, cultivar (only 'Zorzal'), plant density and weed

control. The main differences of the agronomic management among farmers were the amount of N applied, the irrigation system and the amount of water applied in the whole season. Farmer 2 used a N dosage of 138 kg N ha⁻¹, farmer 3 applied 46 kg N ha⁻¹ and farmer 4 fertilized with 51 kg N ha⁻¹. Regarding the irrigation system and the amount of water applied, this practice was done as follows: Farmer 2 used a subsurface drip irrigation (SDI) system and applied 2,000 m³ ha⁻¹; farmer 3 used furrow irrigation system and applied 5,000 m³ ha⁻¹, and farmer 4 utilized sprinkler irrigation system (SIS) and irrigated 2,000 m³ ha⁻¹. The GY and HI were quantified at harvest on February 15, 2020, by harvesting randomly 12 rows of 1 m in different places at each site. Grains were separated from the plants at laboratory where the grains and the whole plant were weighted and recorded.

Table 1. Nitrogen fertilization and irrigation management used by four farmers relative to the agronomic management proposed in the demonstrative plot (DP) in the season 2019-20.

Site and geographic location	N fertilization (kg ha ⁻¹)	Irrigation system	Water applied in the whole season (m ³ ha ⁻¹)
Demonstration plot 34°59'30" S 72°01'0" W	90	Drip tape	4,800
Farmer 1 34°59'30" S 72°01'0" W	130	Furrow	9,000
Farmer 2 35°02'14" S 72°03'27" W	138	Subsurface drip	2,000
Farmer 3 35°02'58" S 72°04'53" W	46	Furrow	5,000
Farmer 4 35°05'10" S 72°01'24" W	51	Sprinkler	2,000

Evaluations

In each plot, the following traits were evaluated: normalized differential vegetation index (NDVI), canopy coverage (%), N content in leaves at full flowering, grain yield, harvest index and mineral concentrations of the grains. Furthermore, the weight of 100 grains was

recorded and the percentage of defective grains was accounted visually as sucked and spotted grains.

The normalized difference vegetation index (NDVI) was scored with a handheld spectroradiometer (GreenSeeker, Trimble, USA) sensor. NDVI corresponds to the differences between the reflectance (R) in the near-infrared (760 nm) and red (660 nm) band, and it is calculated as: $(R_{760} - R_{660}) / (R_{760} + R_{660})$. Measurements were taken in the central rows of each plot, from the vegetative to reproductive stages of bean production. The NDVI values were plotted against time expressed as days after sowing. The canopy coverage was obtained by red-green-blue (RGB) imaging collected at different dates throughout the growing season using a digital camera (Sony® model DSC-H300). Subsequently, the images recorded from each plot were analyzed using the CerealScanner tool (<https://gitlab.com/sckefauver/cerealscanner>) of the open-source ImageJ analysis platform FIJI (Fiji is Just ImageJ; <http://fiji.sc/Fiji>), which was used to extract the different parameters of coloring information of the images (Kefauver et al., 2017). At full flowering stage, full expanded leaves were collected from four different plants of each plot and total N content was analyzed by the Kjeldhal procedure (Sadzawka et al., 2007). At harvest, pods number and grain yield were scored and the harvest index (HI) was calculated. Mineral composition of grains was determined according to the Chilean chemical procedures for plant materials (Sadzawka et al., 2007).

Physical properties and morphological analysis

The four bean cultivars were analyzed using a stereomicroscope Leica model S8 APO, equipped with a digital camera model MC 170 HD. To determine the cultivar's average size, samples of 100 units were randomly selected and placed in two different positionings, vertical and horizontally with a double contact tape in a glass slide (Muñoz et al., 2012). Subsequently, images from different positions were acquired and stored to later be analyzed. The images were processed by image analysis using the open-source ImageJ analysis platform (Schneider et al., 2012). Firstly, the images were binarized (black and white) to then process them and obtain the three dimensions: length (L), width (W) and thickness (T). The geometric diameter (Dg) and the sphericity (Φ) were determined using the equation (1) and (2) respectively (Tunde-Akintunde & Akintunde, 2004):

$$Dg = (LWT)^{(1/3)} \quad (1)$$

$$\phi = (LWT)^{(1/3)} / L \quad (2)$$

where L is the length, W is the width and T is the thickness, all of them expressed in mm.

The surface area expressed in mm², was determined using the equation (3):

$$S = \pi Dg^2 \quad (3)$$

Where Dg corresponds to geometric diameter.

Finally, the weight of 1000 seeds (W_{1000}) was determined analyzing five samples of 100 seeds of each cultivar. Each sample was weighed in an electronic balance with 0.0001 g accuracy (model BA2204B, BIOBASE, Germany) and the weight was extrapolated at 1000 seeds.

Nutritional Analysis

The nutritional composition was performed in triplicate by using AACC methods and expressed in g/100 g in dry basis (AOAC, 1995). The moisture was determined in an oven (Biobase, model XX, China) at 105 °C to reach constant weight; the protein content was determined by using the Kjeldahl method, the lipid was extracted with petroleum ether under reflux conditions by Soxhlet technique (Soxtec 2050, FOSS) and ash content was determined in a muffle furnace by incineration at 600°C; ash content was determined according to Official Methods 08-03 (AACC, 2000). Finally, the nitrogen free extract (NFE) was determined by difference.

Data analyses

In the first experiment 2018, the parameters were evaluated by using multifactor analysis of variance (MANOVA), being the main sources of variation: irrigation, N dose and cultivars. For grain yield, weight of 100 grains, N concentration in leaves and defective grains, the main source of variation was the cultivar, hence those parameters were tested by one-way ANOVA, and means were separated using Tukey test (p-value<0.05). For grains' mineral concentrations, the sources of variation were irrigation and cultivar, hence we applied the MANOVA to explain the observed differences. In the experiment 2019, the farmer was used as unique factor, and a one-way ANOVA was performed. Statistical analyses were performed with StatPlus® Software, and graphics were drawn by using GraphPad Prism® v8.

3. Results

In the first experiment 2018, the main source of variation for all the parameters evaluated were the bean cultivars and the importance of the genetics used (Table 2). Tórtola bean cultivars (‘Torcaza’ and ‘Zorzal’) exhibit higher grain yield (GY) than ‘Curi’ and ‘Blanco Español’ (BE) cultivars. In the case of ‘Zorzal’, it reached 78.7% and 66.1% higher GY than ‘Curi’ and BE, respectively (Figure 1). Grain weight was similar for Tórtola cultivars and BE (~50 g per 100 grains), whereas ‘Curi’ produced smaller grains (~20 g per 100 grains) (Figure 2).

Table 2. Main effects of irrigation, N dose and cultivars on grain yield of *Phaseolus vulgaris* L. growing in Curepto, Maule Region, Chile. Multifactor ANOVA, df: degree of freedom, MS: mean squares, F: F ratio.

Source of Variation	df	MS	F	p-value
Irrigation	1	0.38	0.01	0.919
N dose	1	90.25	2.54	0.117
Cultivars	3	4,325.05	121.9	0.000
Irrigation x N dose	1	5.94	0.17	0.684
Irrigation x Cultivars	3	7.03	0.19	0.897
N Level x Cultivars	3	16.66	0.47	0.705
Irrigation x N dose x Cultivars	3	13.79	0.39	0.762
Within Groups	48	35.48		
Total	63	236.31		

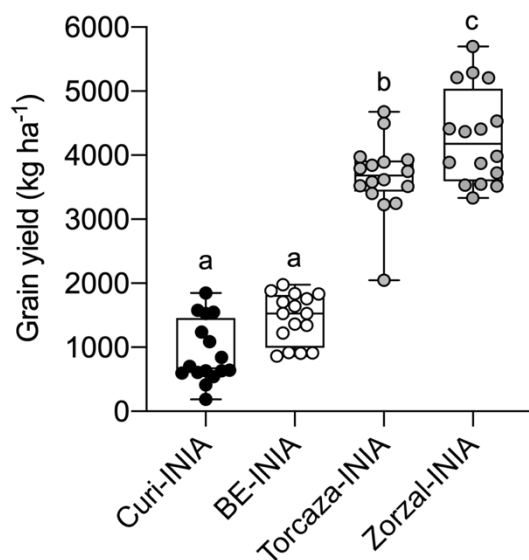


Figure 1. Grain yields of four *Phaseolus vulgaris* L. cultivars grown under two different water supply regimes and two N levels. BE-INIA: Blanco Español-INIA. Statistical

differences are shown after an ANOVA test, different letters indicate differences among treatments after the Tukey test ($P < 0.05$)

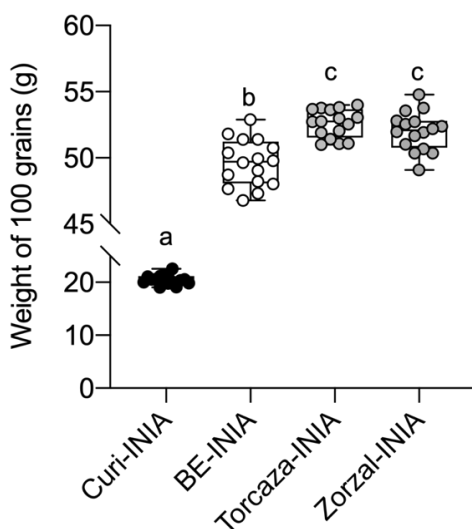


Figure 2. Weight of 100 grains of four *Phaseolus vulgaris* L. cultivars grown under two different water supply regimes and two N levels. BE-INIA: Blanco Español-INIA. Statistical differences are shown after an ANOVA test, different letters indicate differences among treatments after the Tukey test ($P < 0.05$).

No clear differences were observed for NDVI among the four bean cultivars (Figure 3). This parameter increased until the plant growth reached a maximum value of 0.8, which occurred at 75 days after sowing (DAS), followed by NDVI value decreases. The canopy coverage (CC) resulted in a similar response pattern, increasing through the growth period until 75 DAS, and subsequently a decreasing trend occurred as a consequence of the senescence process (Figure 4). The CC values showed differences among cultivars, indicating that 'Curi' and BE did not attain the same coverage and started to diminish earlier than the Tórtola cultivars. Tórtola cultivars reached a CC of about 80% and they started to decay after 85 DAS, whereas BE also reached 80% of CC, but it started to decline at 75 DAS. For 'Curi', the CC had a maximum value of 60% and it started to decrease at 75 DAS. In all cases, CC did not reach a full coverage, indicating that a higher plant density should be used, for instance using 50 cm of row spacing. Nitrogen in leaves showed differences among bean cultivars, being 14% and 10% higher for the 'Torcaza' beans than for BE and 'Curi', respectively (Figure 5). The difference for leaf N concentration between the two Tórtola

cultivars was 6% higher in 'Torcaza' than 'Zorzal'. However, the leaf N concentration was about 4% at full flowering for all cultivars.

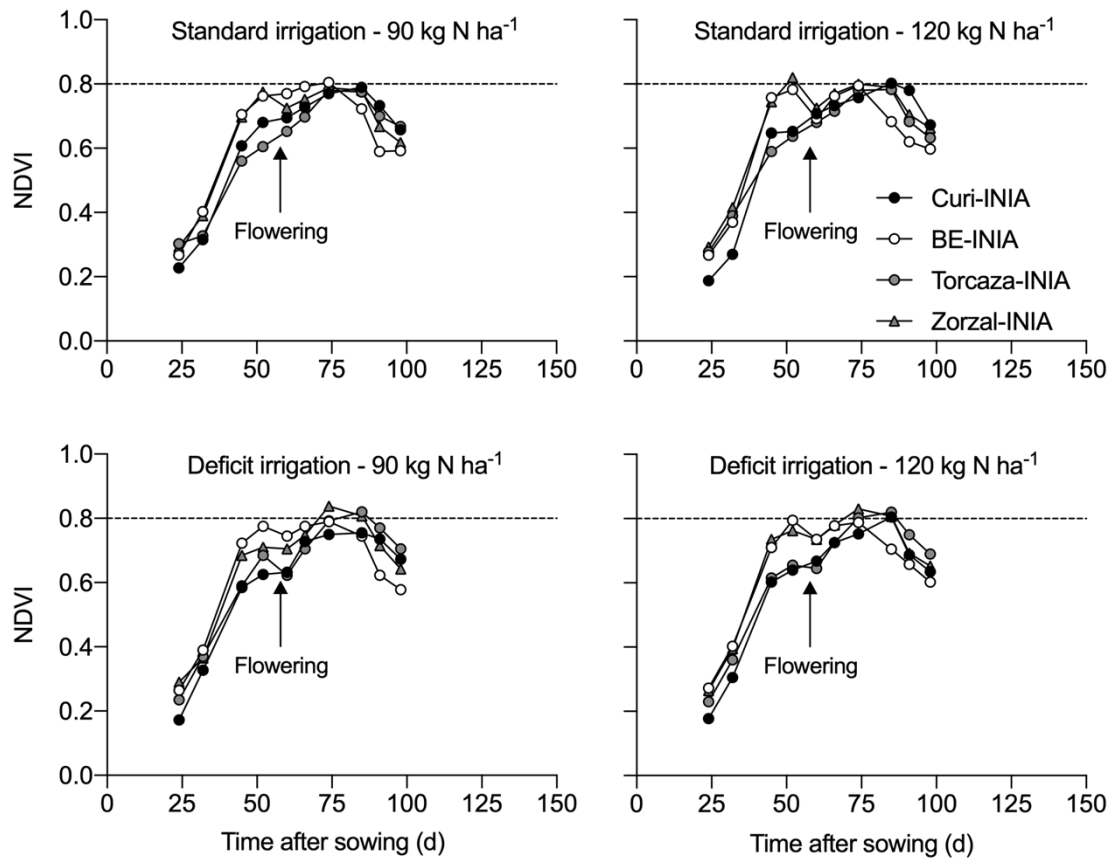


Figure 3. Normalized difference vegetation index (NDVI) of four *Phaseolus vulgaris* L. cultivars grown under two different water supply regimes and two N levels. BE-INIA: Blanco Español-INIA. Standard irrigation means 9 applications of water with a total seasonal amount of 5,400 m³, while deficit irrigation means 7 applications with a total volume of 4,200 m³.

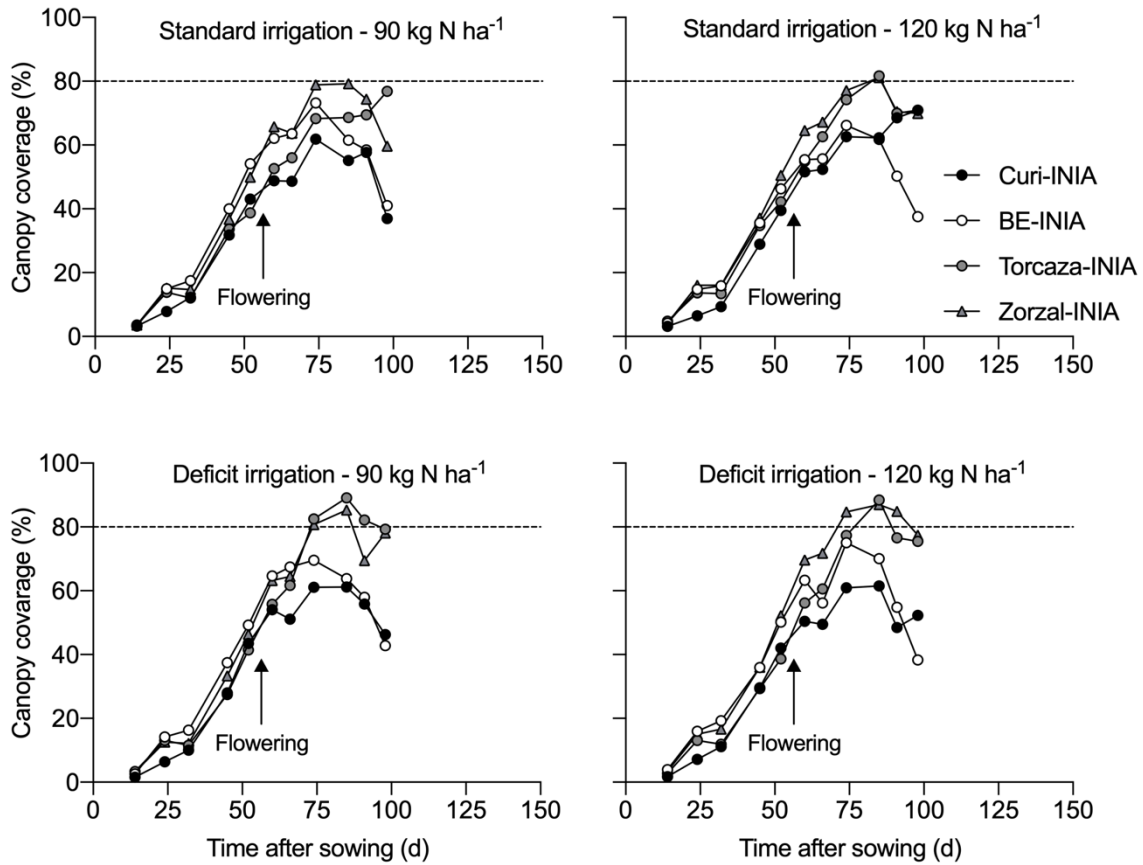


Figure 4. Canopy coverage of four *Phaseolus vulgaris* L. cultivars grown under two different water supply regimes and two N levels. BE-INIA: Blanco Español-INIA. Standard irrigation means 9 applications of water with a total seasonal amount of 5,400 m³, while deficit irrigation means 7 applications with a total volume of 4,200 m³.

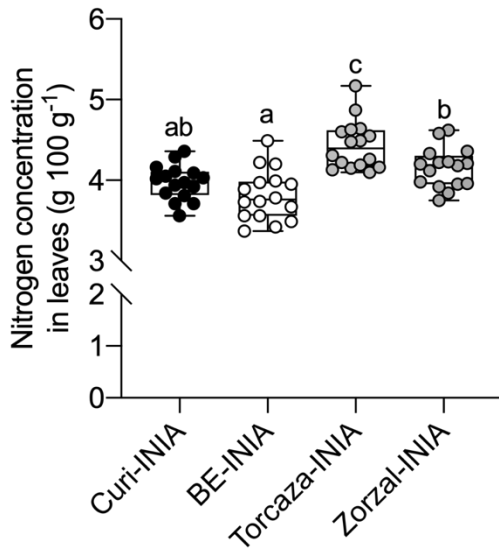


Figure 5. Nitrogen (N) concentration in leaves at full flowering stage of four *Phaseolus vulgaris* L. cultivars grown under two different water supply regimes and two N levels (since no differences were registered for water and N levels [data not shown], the average of all treatments was calculated). BE-INIA: Blanco Español-INIA. Statistical differences are shown after an ANOVA test, different letters indicate differences among treatments after the Tukey test ($P < 0.05$).

The amount of water applied in the irrigation did not affect the grain quality, however, there were differences for defective grains among cultivars. The number of grains sucked and spotted was higher for 'Curi' and BE than for the Tórtola cultivars. In this sense, the number of defective grains in 'Curi' and BE were 4.9% and 3.5%, respectively, whereas for 'Torcaza' and 'Zorzal' it was 2.0 and 1.3%, respectively (Figure 6). The percentage of defective grains yielded 9.3 and 26.1 kg ha⁻¹ in 'Curi' and BE while the total amount of defective grains per hectare reached 38.5 and 27.8 kg for 'Torcaza' and 'Zorzal', respectively.

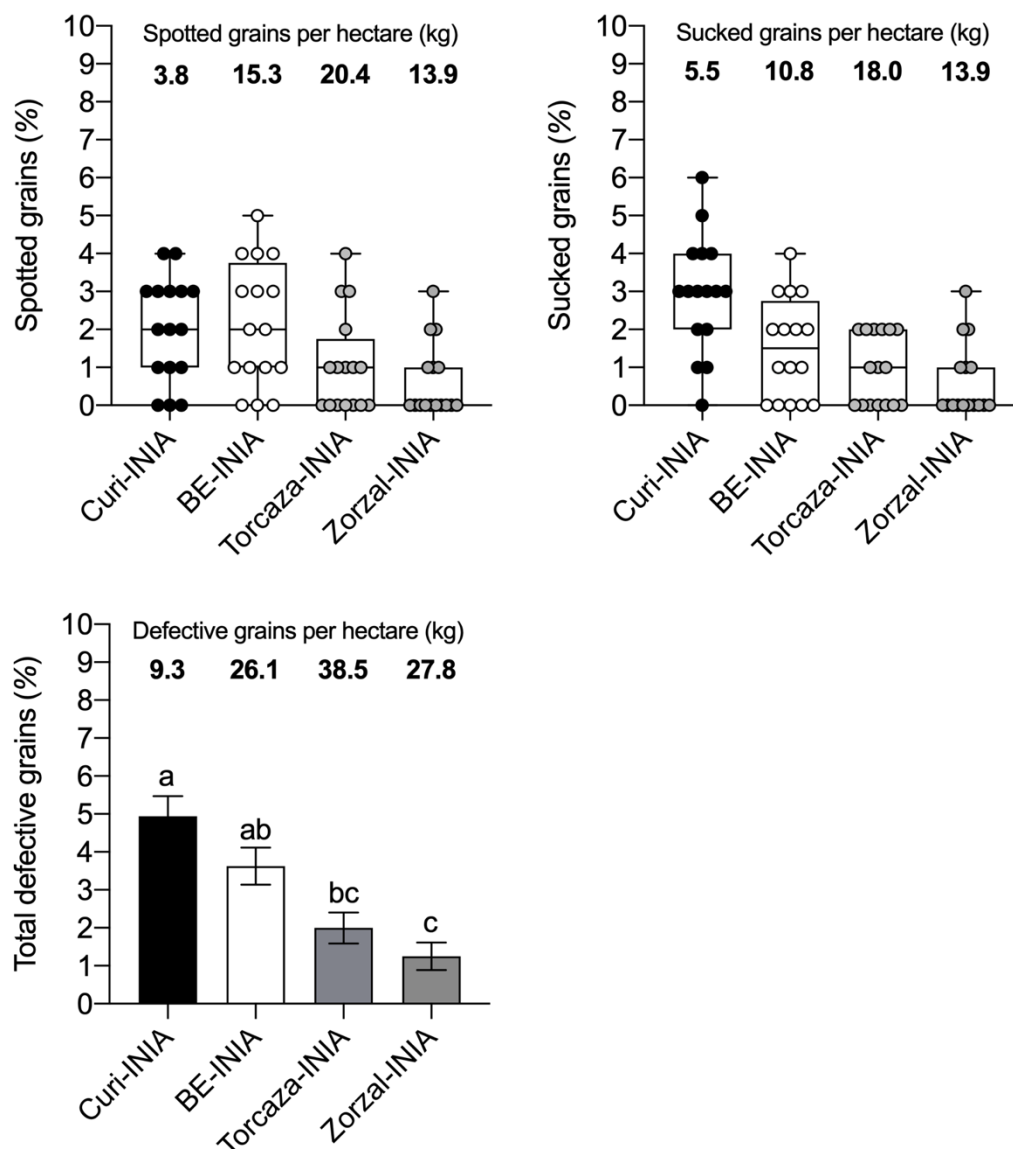


Figure 6. Defective grains at harvest of four *Phaseolus vulgaris* L. cultivars grown under two different water supply regimes and two N levels. The numbers above the bars indicate the calculated amount of grains defective per hectare considering the percentage of defective grains found in the experimental plots. BE-INIA: Blanco Español-INIA. Statistical differences are shown after an ANOVA test, different letters indicate differences among treatments after the Tukey test ($P < 0.05$).

Mineral concentration of grains was significantly affected by the amount of water applied and by the cultivars (Table 3). Some interactions were found for Ca, Mg and Mn among irrigation and cultivars, and a triple interaction for N, although the N level did not affect the nutrient concentration itself. The effect of water applied was more relevant for N, P, K, Mg, Zn and B while the cultivars affected the concentration of all nutrients. The deficit irrigation

treatment resulted in an increase of N, P, K, Mg and Zn, and in a decrease of B. Among the nutrients that increased, the most evident was Zn with about 3.6 mg kg⁻¹ more concentration in grain beans under deficit irrigation, independently of cultivar and N level.

Table 3. Mineral composition of grains of *Phaseolus vulgaris* L. grown in the 2018-2019 season under different water and N management in Curepto, Maule Region, Chile.

Cultivars	g 100 g ⁻¹					mg kg ⁻¹				
	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Cu	Fe	B
<i>Standard irrigation and 90 kg N ha⁻¹</i>										
Curi	3.41	0.52	1.87	0.15	0.20	15.0	35.3	10.2	69.2	14.3
BE	3.56	0.53	1.75	0.14	0.17	16.7	41.0	10.4	73.9	12.7
Torcaza	3.30	0.42	1.81	0.07	0.17	13.7	36.1	11.8	68.1	12.3
Zorzal	3.18	0.42	1.84	0.15	0.18	12.3	35.9	10.7	66.3	15.7
<i>Standard irrigation and 120 kg N ha⁻¹</i>										
Curi	3.43	0.49	1.76	0.14	0.19	15.3	34.1	10.4	79.1	14.4
BE	3.57	0.51	1.74	0.13	0.17	16.9	41.0	10.3	72.5	12.6
Torcaza	3.47	0.42	1.81	0.07	0.16	14.5	36.2	11.9	68.1	11.1
Zorzal	3.15	0.43	1.88	0.13	0.18	12.8	35.7	11.0	65.8	14.4
<i>Deficit irrigation and 90 kg N ha⁻¹</i>										
Curi	3.74	0.51	1.93	0.15	0.21	17.6	38.1	10.3	75.2	12.2
BE	3.79	0.54	1.82	0.18	0.19	14.9	44.4	11.1	75.2	11.2
Torcaza	3.82	0.47	1.83	0.10	0.18	12.7	40.9	12.0	69.9	11.6
Zorzal	3.47	0.43	1.91	0.10	0.18	15.2	38.2	11.4	68.2	11.2
<i>Deficit irrigation and 120 kg N ha⁻¹</i>										
Curi	3.75	0.51	1.90	0.14	0.20	16.8	38.5	11.3	73.9	13.4
BE	3.86	0.55	1.84	0.17	0.19	16.1	44.0	10.0	72.9	10.6
Torcaza	3.77	0.46	1.81	0.12	0.19	13.0	39.6	12.0	71.1	11.6
Zorzal	3.68	0.45	1.92	0.08	0.18	15.3	40.0	11.5	70.5	11.6
<i>Average for irrigation</i>										
Standard	3.38	0.47	1.81	0.13	0.18	14.7	36.9	10.9	70.4	13.4
Deficit	3.73	0.49	1.87	0.13	0.19	15.2	40.5	11.2	72.1	11.6
<i>Average for N dose</i>										
90 kg ha ⁻¹	3.53	0.48	1.84	0.13	0.18	14.7	38.7	10.9	70.7	12.6
120 kg ha ⁻¹	3.58	0.48	1.83	0.12	0.18	15.1	38.7	11.1	71.8	12.4
<i>Average for cultivars</i>										
Curi	3.58	0.50	1.86	0.14	0.20	16.1	36.4	10.5	74.4	13.5
BE	3.69	0.53	1.79	0.16	0.18	16.3	42.7	10.4	73.6	11.7
Torcaza	3.59	0.44	1.81	0.09	0.18	13.5	38.2	12.0	69.3	11.6
Zorzal	3.37	0.43	1.89	0.12	0.18	13.8	37.4	11.2	67.8	13.3
<i>Source of variation</i>										
	<i>p-value</i>									
Irrigation	0.000	0.000	0.001	0.313	0.000	0.052	0.000	0.236	0.173	0.000
N dose	0.089	0.550	0.529	0.064	0.516	0.135	0.946	0.508	0.405	0.693
Cultivars	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Irrigation x N dose	0.795	0.098	0.700	0.664	0.516	0.561	0.840	0.356	0.405	0.119
Irrigation x Cultivars	0.183	0.099	0.242	0.000	0.000	0.000	0.880	0.690	0.845	0.021
N dose x Cultivars	0.829	0.333	0.330	0.176	0.886	0.643	0.699	0.287	0.397	0.464
Irrig. x N dose x Cultivars	0.048	0.554	0.637	0.822	0.591	0.435	0.581	0.375	0.200	0.720

In the second experiment carried out in the season 2019, a demonstration plot was set up and the GY and HI values were compared against those obtained by four farmers (Figure 7). In the demonstration plot, GY achieved 4 ton ha⁻¹ with a N dose of 90 kg ha⁻¹, while the highest GY attained 5.4 ton ha⁻¹, reached by farmer 1 who used a N dose of 130 kg ha⁻¹ and almost twice the amount of water used in the demonstration plot. Farmer 2 followed a comparable crop management as used in the DP, and the GY was also similar. Farmers 3 and 4 reached GY values of 2.1 and 1.4 ton ha⁻¹, respectively. There was a clear positive correlation among water supply and GY, although the bean field irrigated with the subsurface system (farmer 2) reached a similar yield with less than half of the water applied compared to the demonstration plot that was irrigated with drip tape. The HI values in all cases were similar, although the highest HI was obtained by Farmer 3.

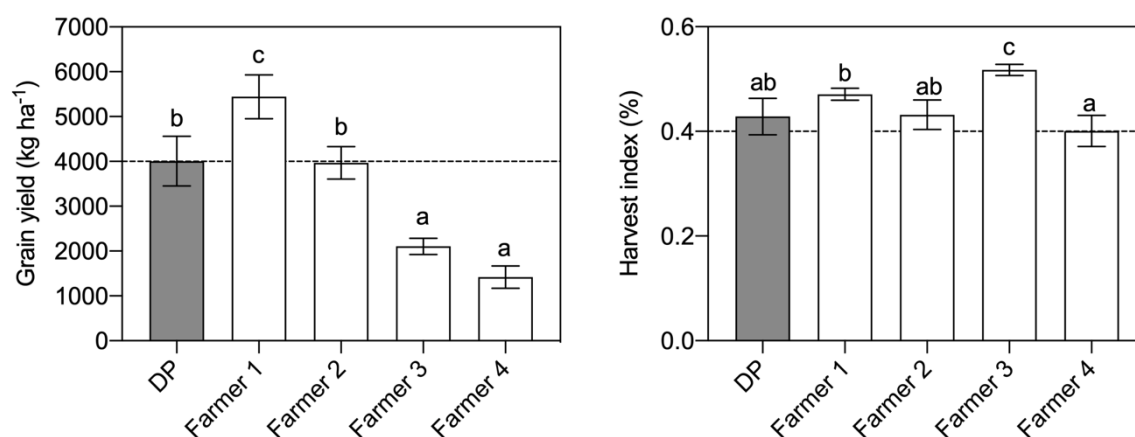


Figure 7. Grain yield (GY) and harvest index (HI) for a demonstration plot (DP) at field scale compared with the GY and HI values of four farmers who managed the crop as regularly. Farmer 1 (Mr. Farias) used 130 kg N ha⁻¹ and 9,000 m³ ha⁻¹ of irrigation water in the whole growth season, farmer 2 fertilized with 138 kg N ha⁻¹ and 2,000 m³ ha⁻¹, farmer 3 and 4 fertilized with 46 kg N ha⁻¹ and 51 kg N ha⁻¹, and the water applied was 5,000 and 2,000 m³ ha⁻¹, respectively. In all experimental sites the cultivar used was 'Zorzal'. Statistical differences are shown after an ANOVA test, different letters indicate differences among treatments after the Tukey test (P<0.05).

Nitrogen concentration of grains in the second experiment was around 3% for the DP and farmers 1, 2 and 3, although the beans cultivated by Farmer 4 reached up to 4.4% (Table 4). For P concentration, it was about 0.5% for grains from DP and farmers 1 and 2, decreasing to 0.4 and 0.3% in the grains from farmers 3 and 4. The K concentration was more conserved

in all grains analyzed being of about 1.6 to 1.7% with the exception of K concentration of grains from Farmer 4, which shown a decreased concentration of 1.3%. For the macronutrients Ca and Mg, their concentration was similar for all plots, although as for the P and K, the grains from Farmer 4 had a lower concentration. Micronutrients shown a more random concentration in the grains from all plots although all elements are in the normal concentration range according to the levels reported by Paredes et al. (2009).

Table 4. Mineral composition of grains of *Phaseolus vulgaris* L. cultivated by different farmers using distinct N fertilization and irrigation management in Curepto, Maule Region, Chile.

	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Cu	Fe	B
	g 100 g ⁻¹					mg kg ⁻¹				
DP	3.03a	0.47bc	1.62b	0.20a	0.18bc	11.50a	40.75b	10.50b	58.25a	11.00a
Farmer 1	2.92a	0.50ab	1.67ab	0.21ab	0.20ab	12.25a	38.50b	11.00b	59.25a	17.75a
Farmer 2	2.94a	0.53a	1.73a	0.19ab	0.20a	11.50ab	48.25a	14.50a	53.75a	8.75a
Farmer 3	2.96a	0.43c	1.64ab	0.18ab	0.18c	9.50b	40.25b	10.50b	64.75a	14.00a
Farmer 4	4.39b	0.31d	1.33c	0.15b	0.16c	10.25b	44.50ab	9.50b	56.00a	9.00a

Different letters denote differences between farmers (Tukey, $p < 0.05$).

Physical and morphological properties of grains were not affected by irrigation or by N dose (Table 5). The main source of variation were the cultivars which affected all the parameters evaluated. Tórtola cultivar (‘Torcaza’ and ‘Zorzal’) exhibited the longest grains while ‘Curi’ was the shortest, in a similar way while ‘Blanco Español’ was the widest and thickest. About the sphericity and surface area, ‘Blanco Español’ produced the more spherical grains and with the greatest area. The weight of 1000 grains (W_{1000}) was higher for ‘Zorzal’ beans and ‘Curi’ produced the lowest weight. Conversely, the nutritional composition of beans was affected by cultivars, N dose and the amount of water applied (Table 6). The higher protein content was achieved by the cultivar ‘Blanco Español’ while the deficit irrigation produced an increase in the protein content. Tórtola beans produced grains with low fats in comparison to ‘Blanco Español’ and ‘Curi’, although this parameter was more random distributed in all plots. Total mineral composition expressed as ashes was increased by the deficit irrigation and with the 90 kg/ha N applied. ‘Zorzal’ cultivar recorded higher ash content in comparison to the other cultivars. Although the N free extract (NFE) was affected by all factors, the concentration was very similar for all cultivars under the different agronomic managements

studied. Finally, the energy was higher for `Torcaza` although, as for the NFE, it was in a narrow range of variation.

Table 5. Physical and morphological properties of grains of *Phaseolus vulgaris* L. grown under different water and N management in Curepto, Maule Region, Chile.

Cultivars	Length	Width	Thickness	Geometric	Sphericity	Surface Area	W ₁₀₀₀
				mean diameter			
	----- mm-----				%	mm ²	g
<i>Standard irrigation and 90 kg N ha⁻¹</i>							
Curi	8.85	5.92	4.37	6.38	0.69	117.56	206.16
BE	11.03	8.42	7.21	8.89	0.79	240.41	504.43
Torcaza	11.90	7.39	6.28	8.52	0.69	211.75	477.88
Zorzal	11.99	7.53	6.32	8.62	0.69	216.21	513.46
<i>Standard irrigation and 120 kg N ha⁻¹</i>							
Curi	9.16	6.25	4.85	6.75	0.71	133.59	217.64
BE	10.70	8.11	7.19	8.67	0.80	229.47	459.01
Torcaza	12.31	7.68	6.55	8.85	0.69	228.51	509.16
Zorzal	12.08	7.67	6.61	8.79	0.70	226.46	504.42
<i>Deficit irrigation and 90 kg N ha⁻¹</i>							
Curi	8.92	6.17	4.49	6.53	0.70	123.92	203.07
BE	11.58	8.55	7.60	9.24	0.79	260.11	539.46
Torcaza	12.45	7.51	6.59	8.85	0.68	227.49	539.23
Zorzal	11.40	7.32	6.36	8.36	0.71	205.96	489.16
<i>Deficit irrigation and 120 kg N ha⁻¹</i>							
Curi	8.90	5.99	4.26	6.38	0.69	116.70	202.78
BE	11.35	8.49	7.42	9.09	0.79	251.26	534.53
Torcaza	12.17	7.67	6.62	8.82	0.70	228.38	507.25
Zorzal	12.75	8.52	7.40	9.56	0.73	271.58	543.19
<i>Average for irrigation</i>							
Standard	11.00	7.37	6.17	8.18	0.72	200.50	424.02
Deficit	11.19	7.53	6.34	8.35	0.72	210.67	444.83
<i>Average for N dose</i>							
90 kg ha ⁻¹	11.02	7.35	6.15	8.17	0.72	200.43	434.11
120 kg ha ⁻¹	11.18	7.55	6.36	8.36	0.73	210.74	434.75
<i>Average for cultivars</i>							
Curi	8.96	6.08	4.49	6.51	0.70	122.94	207.41
BE	11.17	8.40	7.35	8.97	0.79	245.31	509.36
Torcaza	12.21	7.56	6.51	8.76	0.69	224.03	508.38
Zorzal	12.06	7.76	6.67	8.83	0.71	230.05	512.56
<i>Source of variation</i>				<i>p-value</i>			
Irrigation	0.4779	0.3611	0.3040	0.2454	0.8876	0.1693	0.0000
N dose	0.5378	0.2548	0.3040	0.1996	0.4958	0.1638	0.6844
Cultivars	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Irrigation x N dose	0.8790	0.6268	0.7894	0.8574	0.8215	0.7534	0.0291
Irrigation x Cultivars	0.7972	0.8899	0.5238	0.6588	0.7574	0.5889	0.0000
N dose x Cultivars	0.5925	0.3526	0.4107	0.2128	0.9699	0.1460	0.0000
Irrig. x N dose x Cultivars	0.5768	0.4113	0.4622	0.2517	0.8478	0.2329	0.0000

Table 6. Nutritional composition of grains of trials carried out in Curepto, Maule Region, in the 2018-2019 season.

Cultivars	Proteins	Fat	Ash	Crude fibre	NFE	Energy
	-----g 100 g ⁻¹ -----					Kcal 100 g ⁻¹
<i>Standard irrigation and 90 kg N ha⁻¹</i>						
Curi	25.74	1.32	4.58	4.33	55.51	336.90
BE	26.02	1.36	4.47	3.15	57.37	345.79
Torcaza	24.82	1.51	4.70	8.98	59.98	352.84
Zorzal	25.01	0.77	4.84	7.39	61.98	354.93
<i>Standard irrigation and 120 kg N ha⁻¹</i>						
Curi	24.17	1.41	4.22	4.18	57.32	338.67
BE	25.8	1.25	4.33	3.01	57.33	343.81
Torcaza	26.01	1.18	4.75	3.30	64.76	373.70
Zorzal	22.11	1.34	4.19	3.05	61.96	348.38
<i>Deficit irrigation and 90 kg N ha⁻¹</i>						
Curi	24.23	1.29	4.94	7.97	61.56	354.81
BE	25.71	1.14	4.32	3.58	57.11	341.59
Torcaza	25.05	0.87	4.90	9.85	59.33	345.34
Zorzal	24.53	1.41	4.73	8.45	60.88	354.36
<i>Deficit irrigation and 120 kg N ha⁻¹</i>						
Curi	25.52	1.49	4.58	4.06	55.81	388.77
BE	26.37	1.30	4.60	6.42	61.30	362.43
Torcaza	24.89	0.32	4.63	7.07	63.09	354.83
Zorzal	24.71	0.89	5.02	14.76	54.63	325.33
<i>Average for irrigation</i>						
Standard	24.96	1.27	4.51	4.67	59.53	349.38
Deficit	25.19	1.08	4.70	7.76	59.06	346.68
<i>Average for N dose</i>						
90 kg ha ⁻¹	25.20	1.20	4.67	6.63	59.06	347.89
120 kg ha ⁻¹	24.95	1.15	4.54	5.73	59.53	348.24
<i>Average for cultivars</i>						
Curi	25.01	1.39	4.53	4.73	56.98	340.50
BE	25.98	1.26	4.43	4.04	58.28	348.40
Torcaza	25.19	0.97	4.75	7.30	61.79	356.68
Zorzal	24.09	1.10	4.69	8.41	59.86	345.75
<i>Source of variation</i>						
				<i>p-value</i>		
Irrigation	0.0043	0.0000	0.0000	0.0000	0.0020	0.0000
N dose	0.0016	0.0009	0.0001	0.0000	0.0021	0.7242
Cultivars	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Irrigation x N dose	0.0000	0.0000	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000
Irrigation x Cultivars	0.0000	0.0000	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000
N dose x Cultivars	0.0000	0.0000	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000
Irrig. x N dose x Cultivars	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

NFE: Nitrogen-free extract.

4. Discussion

Tórtola bean cultivars produce high yields in the Maule Region

World bean yields of 0.88 ton ha⁻¹ were estimated in 2018, and the Chilean bean yields reached 1.76 ton of grains ha⁻¹ (FAOSTAT, 2020). Although most of the Chilean bean production is cultivated under irrigation, contrary to the rainfed bean production in several parts of the world (Mukeshimana et al., 2014), the fact that yields of up to 5.4 ton of grains ha⁻¹ (farmer 1) were reached in this study is quite remarkable since it represents more than six and three times the world and the Chilean average yields of beans, respectively. The high yields of Tórtola beans are largely undocumented in the Maule Region, although some previous studies highlight the importance of legumes in terms of the N₂ fixed by annual legume mixtures that constitute an important input of N to the following cereal crop (i.e., wheat) grown in the Maule Region (Espinoza et al., 2012; 2020). Considering that the majority of the Chilean bean production (60%) was produced in the Maule Region in 2018/2019 (ODEPA, 2020) plus the fact that the COVID-19 pandemic has affected the food security of the Chilean population (Kanter and Boza, 2020), Tórtola bean production in this particular region is an important opportunity for Chile and for developing it further from a scientific and technical standpoint, which will ultimately benefit the farmers.

Most of the differences identified between the treatments evaluated in this study came from the use of distinct cultivars (Table 2), being the genetics employed by the farmer very relevant to obtain high productivity. In this context, the two Tórtola cultivars (‘Torcaza’ and ‘Zorzal’) achieved 273.5% and 434.5% higher yields on average than ‘Blanco Español’ and ‘Curi’, respectively (Fig. 1), in the first experiment (2018-2019 season). The high productivity of the Tórtola materials is in agreement with the literature (Tay and Tay, 2018), particularly ‘Zorzal’, and this was confirmed in this work. Further experimentation is required to understand how specifically the use of specific genotypes with the environment (temperatures, radiation, soils) and their interactions convert this part of the Maule region (Curepto) as a “hotspot” for Tórtola bean production.

Plant densities and canopy coverage

The canopy coverage (CC) is an important vegetation index that is related to N nutrition and with the ability of plants to compete for resources with weeds (Jones et al., 2003; Teasdale and Frank, 1983). Traditionally, the beans cultivated in central Chile are sown at a row spacing of 75 cm by using sowing equipment used for maize production. In the current experiment, the CC was not completely closed (Fig. 4), allowing the fast establishment of weeds. Since one of the experiments was irrigated with drip irrigation tapes, the soil between rows was maintained almost free of weeds, although this is not the case for farmers that traditionally water the field with furrow irrigation system. To reach higher yields, it is necessary to increase the bean plant density, for instance, by sowing at a row spacing of 50 cm which results in a plant density of 280,000 plant ha⁻¹ versus the current plant density of about 180,000 plants ha⁻¹. Such increase will allow the plants to intercept 20% more radiation than bean plants grown at the current sowing spacing, and reduce weeds which ultimately results in yield increase. More dense sowing resulted in a grain increase of 30% to 70% compared to random sowing and a reduction of weed biomass in a bean experiment carried out in Rwanda (Dusabumuremyi et al., 2014). Similar results were obtained by Merga (2020) by increasing the row spacing from 60 to 30 cm, being the optimal spacing of 40 cm with 250,000 plants ha⁻¹, which is close to the recommended plant density suggested above. This author also showed that with this density (40 cm of row spacing), there was an increase in the number of pods per plant, nodules per plant and the harvest index, whereas an increase of plant density (30 cm row spacing) resulted in an intra specific competition of the plants for resources that finally affected the yields (Merga, 2020).

Nitrogen management

Nitrogen nutrition is a critical agronomic management to reach high yields in common beans since the ability to fix atmospheric N₂ is limited. A pioneer work conducted by Hardarson et al. (1993) analyzed the contribution of N₂ fixation to the nutrition of several common bean cultivars, including two materials that are similar to those used in the current experiment ('Blanco Español' and Tórtola). The amount of N₂ fixed reached about 25 and 50 kg N ha⁻¹ for 'Blanco Español' and Tórtola, respectively, indicating that the ability of the N₂ fixation cannot fully sustain the N demanded by this crop. In this sense, the experiment carried out

with the two INIA Tórtola cultivars in 2018 and 2019 were fully fertilized with N, specifically with urea (46% N). The measurement of N concentration in leaves (Fig. 5) indicated that Tórtola beans absorbed slightly more N than 'Blanco Español' and 'Curi', although these differences were not mirrored in the NDVI measurements (Fig. 3). The N doses tested in the first experiment (90 and 120 kg N ha⁻¹) did not produce differences in bean yield and based on those results, we suggested to the farmers using just 90 kg N ha⁻¹ in the next extensive experiment (season 2019). The lack of differences among the two N doses could likely be due to the N mineralization from soil, which can release about 40 kg N ha⁻¹ in Mediterranean conditions in irrigated fields (Salazar et al., 2020). In the case of Farmer 1, he applied 130 kg N ha⁻¹ and the double amount of water (9,000 m³ ha⁻¹) than the DP, and he reached the highest bean yields (5.4 ton ha⁻¹), although with the same N use efficiency that in the demonstrative plot, in which 90 kg N ha⁻¹ was used. Farmer 2 also utilized a higher N dose (138 kg N ha⁻¹) while farmer 3 and farmer 4 used 46 and 51 kg N ha⁻¹, respectively. The lower N doses used by farmers 3 and 4 could explain the low bean yields achieved by these farmers. The N dose applied by the farmers did not greatly affect the nutrient concentration of grains, although some statistical differences were detected. Macro and micronutrient concentrations in common beans were in the normal range previously reported for Chilean bean cultivars by Paredes et al. (2009). In the future, our research group will be working with upcoming projects with the aim of making a gradual change from synthetic N fertilization to more sustainable and/or organic production systems (i.e., leguminous green manure) (Yao et al., 2019) to promote sustainable bean production in Chile.

Irrigation

Water application for bean production is the most critical agronomic aspect to be improved besides N management (Sant´Ana et al., 2011; Ntatsi et al., 2018), as it was highlighted by the two season experiments carried out in the Mataquito valley in Central Chile reported in this study. Diminishing the number of irrigations did not produce a significant effect on bean yield reduction in the first season 2018 for any of the bean cultivars tested. In addition, our results show that a more efficient use of water is possible by introducing irrigation systems different to furrow irrigation, in which drip irrigation methods are significantly more efficient in the use of water than gravitational ones (Sugita et al., 2017), particularly in beans

(Gengoclan et al., 2006). Furthermore, the amount of water applied did not affect the nutrient concentration of bean grains, even for some elements such as N, P, K, Mg and Zn, and the deficit irrigation treatment resulted in small concentration increases of those elements, being the most important for Zn. Previous reports have shown that water deficit impacted negatively the nutrient concentration of beans (Ghanbari et al., 2015; Muñoz-Perea et al., 2005) and faba beans (Xia, 1997). However, the amount of reduced water in the present experiment affected neither GY nor stressed the plants, the irrigation deficit was intended to reduce the excess of water used and to prevent grain defectiveness. Consequently, the use of an irrigation system that allows to reduce the amount of water without significantly affecting the GY, and that also enhances the nutrient concentration of the bean grains is highly recommendable.

In addition, the demonstrative plot in the season 2019-20 showed that using 4,800 m³ ha⁻¹ resulted in 4 tons of grain yield compared with the 5.4 tons of grains reached by farmer 1 who used the double amount of water and 44% higher N dose. This aspect is very relevant, by following the recommendation of using just 90 kg N ha⁻¹ and by irrigating with drip tapes, farmer 1 could double the land surface irrigated with subsequent increase of bean productivity. The effectiveness of reducing the volume of water used was evidenced by the yield obtained in the field irrigated with a subsurface drip system (Farmer 2), reaching 4 tons ha⁻¹ with only 2,000 m³ ha⁻¹ of irrigation. Consequently, incorporating drip irrigation on Tórtola beans is valuable and required to deal with the decreasing rainfalls recorded in the Maule Region in the last seasons (FAO, 2020).

Physical and morphological characterization

The geometrical dimensions, physical properties and statistical analysis of the bean cultivars studied are summarized in Table 5. In general terms, the morphological characteristics of grains are a relevant issue, because they provide important information for crop production, harvest tools, as well as for the selection of appropriate separation and/or classification systems (Razavi et al., 2010; Tunde-Akintunde & Akintunde, 2004). In this study, the main statistically significant differences identified ($p < 0.05$) were those produced by the effect of irrigation and fertilization on the cultivar. The main dimensions, such as length, width and thickness within the same cultivar were not significantly affected by these agronomic

treatments. The same happened with the geometric mean diameter, sphericity and the surface area among the groups of the same cultivar. In the case of weight of 1000 seeds (W_{1000}), W_{1000} was significantly influenced by the irrigation and the cultivar and the interaction between them, but it was also influenced by the interaction between irrigation-N dose, interaction cultivar-N dose and also influenced by interaction between the factors. This result is interesting due to increasing N doses with deficit irrigation can produce an increase in the weight of grains, which is observed in 'Blanco Español', 'Torcaza' and 'Zorzal'. These results reveal that water deficit could have a positive impact on the grain weight. These results are different to the ones of Sezen et al. (2008), who used distinct irrigation frequencies and amounts of water and obtained different effects on length, width and weight of 100 seeds.

Nutritional Analysis

The effects of the two different irrigation treatments (standard and deficit) combined with two fertilization treatments (90 and 120 kg N ha⁻¹) on the nutritional composition of four common bean cultivars are summarized in Table 6. Overall, the nutrient compositions of dry beans make them an important source of protein, complex carbohydrates, dietary fiber and essential vitamins and minerals that are fundamental for the human diet (Geil and Anderson, 1994; Roy et al., 2010).

In general terms, most of the differences identified between the irrigation and the fertilization treatment came from the different cultivars studied. In this context, the irrigation, fertilization and cultivar produced statistically significant differences ($p < 0.05$) on all the nutritional components.

Proteins are one of the most important components in grains legumes, being the unique protein supply in the diet in different parts of the world, and their consumption have been related with beneficial effects on human health (Duranti, 2006). In this study, the protein content for the cultivars studied ranged between 24.17 % to 25.74; 25.71 to 26.37 %; 24.82 to 26.01%; and 22.11 to 25.01 % in 'Curi', 'Blanco Español', 'Torcaza' and 'Zorzal', respectively. The protein content for these cultivars is in agreement with the values previously reported by Hall et al. (2017) for Kidney bean, Navy bean, Pink bean and Pinto bean. The highest protein content was achieved by the cultivar 'Blanco Español' with deficit irrigation and 120 kg N ha⁻¹, followed by 'Torcaza' with standard irrigation and 120 kg N

ha⁻¹; in both cases, the fertilization treatment could have had a positive effect on protein content.

Moreover, as observed in table 6, the Tórtola bean cultivars 'Torcaza' and 'Zorzal' treated with deficit irrigation had the highest crude fiber content compared with 'Curi' and 'Blanco Español' tested under the same conditions. Usually, a high fiber content is associated with the prevention of some chronic disease including obesity, diabetes heart disease and cancer (Padhi and Ramdath, 2017). In particular, the consumption of fiber and carbohydrates from legumes has been related with the decreased of glycemic index and the decreased the risk for developing type 2 diabetes (Ramdath et al., 2016). In addition, legumes are low density and nutrient dense food with an enormous potential to increase satiety and help to body weight management (Clark and Duncan, 2017).

In addition, the cultivars 'Torcaza' and 'Zorzal' with deficit irrigation also had the highest ash content, which is directly related to mineral content. In this sense, the content of Ca, Fe, Mg, K, P and Zn is usually affected by the growing conditions and the environment (Hall et al., 2017). Finally, Tórtola beans show an excellent nutritional quality which could be further improved through the appropriate use of water management and an adequate fertilization program.

5. Conclusions

This work shows the scarce availability of bean studies at the national level and the potential of the existing genetic material in Chile such as the Tórtola class. Our experiments showed that Tórtola beans have a great potential to increase yield by adjusting a few management practices related to the N dose and the irrigation system employed. The adoption of these changes by farmers resulted in an improvement of grain yield, allowing the farmers to use more efficiently the scarce water resources available for irrigation and diminishing the N applied. The latter point is critical for reducing N release to surface water and to increase the economic benefits derived from bean production, which associate to more sustainable productive systems. Other important aspect is related to the superior performance exhibited by Tórtola cultivars compared to 'Curi' and 'Blanco Español' cultivars, which encourage the farmers to use Tórtola cultivars as the main genetic material for bean production in Central Mediterranean Chile. Since beans are an important source of proteins for the Chilean

population, there is a great opportunity to create new cultivars through breeding, taking advantage of the existing genetic materials in Chile, particularly with Tórtola beans. We highlight the need to conduct further research to improve the adaptability of Tórtola beans to both biotic and abiotic stresses, especially to those related to water shortage and to the nutritional quality improvements required for consumers. Finally, switching from synthetic N fertilization to more environmentally-friendly and/or organic production systems will stimulate sustainable bean production in Chile.

6. References

- AACC. (2000). Method 08-03.01: Ash -- Rapid Method. Cereals & Grains Association: AACC.
- AOAC. (1995). Association of Official Analytical Chemists, Official methods of analysis (Vol. 16th Edition). Washington DC: AOAC International.
- Bascur, G. & Tay, J. (2005). Colecta, caracterización y utilización de la variabilidad genética en germoplasma chileno de poroto (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agricultura técnica (CHILE)*, 65(2), pp. 135- 146.
- Becerra, V., Paredes, M. & Debouck, D. (2011). Genetic Relationships of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Race Chile with Wild Andean and Mesoamerican Germplasm. *Chilean journal of agricultural research*, 71(1), pp. 3-15.
- Bedoussac, L., Journet, E. P., Hauggaard-Nielsen, H., Naudin, C., Corre-Hellou, G., Jensen, E. S., et al. (2015). Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 911–935.
- Bettiol, JVT, Filla, VA, Leal, FT, Coelho, AP, Meirelles, FC, Lemos, LB, Bossolani, JW. (2020) Sustainable production of common beans: inoculation, co-inoculation and mineral fertilization in early-cycle cultivars. *Journal of Plant Nutrition* DOI: 10.1080/01904167.2020.1822403.
- Broughton, W. J., Hernandez, G., Blair, M., Beebe, S., Gepts, P., & Vanderleyden, J. (2003). Beans (*Phaseolus* spp.): Model food legumes. *Plant and Soil*, 252, 55–128.
- Clark, S., & Duncan, A. M. (2017). The role of pulses in satiety, food intake and body weight management. *Journal of Functional Foods*, 38, 612-623. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.03.044>

- Cortés, A. J. and Blair, M.W. (2018). Genotyping by Sequencing and Genome–Environment Associations in Wild Common Bean Predict Widespread Divergent Adaptation to Drought. *Front. Plant Sci.* 9, 128.
- Dardanelli, M.S.; Fernández de Córdoba, F.J.; Rosario Espuny, M.; Rodríguez Carvajal, M.A.; Soria Díaz, M.E.; Gil Serrano, A.M.; Okon, Y.; Megías, M. (2008) Effect of *Azospirillum brasilense* coinoculated with *Rhizobium* on *Phaseolus vulgaris* flavonoids and Nod factor production under salt stress. *Soil Biol. Biochem.* 40, 2713–2721.
- Dinelli G, Bonetti A, Minelli M, Marotti I, Catizone P, et al. (2006) Content of flavonols in Italian bean (*Phaseolus vulgaris* L.) ecotypes. *Food Chem* 99(1): 105-114.
- Duranti, M. (2006). Grain legume proteins and nutraceutical properties. *Fitoterapia*, 77(2), 67-82. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.fitote.2005.11.008>
- Dusabumuremyi, P., Niyibigira, C., Mashingaidze, A.B., 2014. Narrow row planting increases yield and suppresses weeds in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in a semi-arid agro-ecology of Nyagatare, Rwanda. *Crop Prot.* 64, 13–18. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014.05.021>
- Espinoza, S., Ovalle, C., Zagal, E., Matus, I., Tay, J., Peoples, M. B., et al. (2012). Contribution of legumes to wheat productivity in Mediterranean environments of central Chile. *Field Crops Research*, 133, 150–159.
- Espinoza et al. (2020). The contribution of nitrogen fixed by annual legume pastures to the productivity of wheat in two contrasting Mediterranean environments in central Chile. *Field Crops Research* 249:107709
- FAO (2020). Available at: <http://www.fao.org/giews/countrybrief/country.jsp?code=CHL> (Accessed on November 2, 2020)

- FAOSTAT. (2020). *Cultivos* [Base de datos]. Available at: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> (Accessed on April 20, 2020)
- Geil, P. B., & Anderson, J. W. (1994). Nutrition and health implications of dry beans: a review. *Journal of the American College of Nutrition*, 13(6), 549-558. doi:10.1080/07315724.1994.10718446
- Gencoglan, C., Altunbey, H., and Gencoglan, S. (2006). Response of green bean (*P. vulgaris* L.) to subsurface drip irrigation and partial rootzone drying irrigation. *Agric. Water Manage.* 84, 274–280.
- Ghanbari, A.A., Mousavi, S.H., Pessarakli, M., 2015. Accumulation of Reserve Compounds in Common Bean Seeds under Drought Stress. *J. Plant Nutr.* 38, 609–623. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.934479>
- Guglielmetti, H., Tay, J., Paredes, M., Miranda, O., Rojas, C., Rodríguez, N., Pardo del C, F., Cárdenas, P., Caballeros, C. & Hetz, E. (1977). Cultivo de poroto en la zona centro sur. *Boletín técnico N° 9 (6)*. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Estación experimental Quilamapu, Chillán, Chile. Available at: <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/boltec/NR15843.pdf> (Accessed on May 15, 2020)
- Guzman-Maldonado, S.H.; Acosta-Gallegos, J.; Paredes-Lopez, O. (2000) Protein and mineral content of a novel collection of wild and weedy common bean (*Phaseolus vulgaris* L). *J. Sc. Food Agric.* 80, 1874–1881.
- Hall, C., Hillen, C., & Garden Robinson, J. (2017). Composition, Nutritional Value, and Health Benefits of Pulses. *Cereal Chemistry*, 94(1), 11-31. doi:10.1094/CCHEM-03-16-0069-FI.
- Hardarson, G., Bliss, F.A., Cigales-Rivero, M.R., Henson, R.A., Kipe-Nolt, J.A., Longeri, L., Manrique, A., Peña-Cabriales, J.J., Pereira, P.A.A., Sanabria, C.A., Tsai, S.M.,

1993. Genotypic variation in biological nitrogen fixation by common bean. *Plant Soil* 152, 59–70. <https://doi.org/10.1007/BF00016333>
- Helmstädter A (2010) Beans and Diabetes: *Phaseolus vulgaris* Preparations as Antihyperglycemic Agents. *J Med Food* 13 (2): 251-254.
- Howarth NC, Saltzman E, Roberts SB (2001) Dietary fiber and weight regulation. *Nutr Rev* 59(5): 129-139.
- Isoi, T., Yoshida, S., 1991. Low nitrogen fixation of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Soil Sci. Plant Nutr.* 37, 559–563. <https://doi.org/10.1080/00380768.1991.10415069>
- Johns MA, Skroch PW, Nienhuis J, Hinrichsen P, Bascur G, Munoz-Schick C (1997) Gene pool classification of common bean landraces from Chile based on RAPD and morphological data. *Crop Sci* 37(2):605–613.
- Jones, H.G., Archer, N., Rotenberg, E., Casa, R., 2003. Radiation measurement for plant ecophysiology. *J. Exp. Bot.* 54, 879–889. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg116>
- Kanter R, Boza S (2020) Strengthening local food systems in times of concomitant global crises: reflections from Chile. *AJPH* 110(7): 971-973.
- Kefauver, S.C., Vicente, R., Vergara-Díaz, O., Fernandez-Gallego, J.A., Kerfal, S., Lopez, A., Melichar, J.P.E., Serret Molins, M.D., Araus, J.L., 2017. Comparative UAV and Field Phenotyping to Assess Yield and Nitrogen Use Efficiency in Hybrid and Conventional Barley. *Front. Plant Sci.* 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01733>
- Ma Y., Bliss F.A. (1978) Seed proteins of common bean. *Crop Sci.* 17, 431–437.
- Maréchal, R., Mascherpa, J., Stainier, F., 1978. Etude taxonomique d'un groupe complexe d'espèces des genres *Phaseolus* et *Vigna*. (Papilionaceae) sur la base de données

morphologiques et polliniques, traitées par l'analyse informatique. *Boissiera* 28, 1–273.

Martínez, J., Silva, H., Ledent, J. & Pinto, M. (2007). Effect of drought stress on the osmotic adjustment, cell wall elasticity and cell volume of six cultivars of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *European Journal of Agronomy* 26, pp.30-38.

Merga, J.T., 2020. Evaluation of common bean varieties (*Phaseolus vulgaris* L.) to different row-spacing in Jimma, South Western Ethiopia. *Heliyon* 6, e04822. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04822>

Mok DWS, Mok MC (1976) A modified Giemsa technique for identifying bean chromosomes. *J Hered* 67(3):187–188.

Muñoz, L. A., Cobos, A., Diaz, O., & Aguilera, J. M. (2012). Chia seeds: Microstructure, mucilage extraction and hydration. *Journal of Food Engineering*, 108(1), 216-224. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.06.037>

Muñoz-Perea, C., Allen, R., Wright, J., Westermann, D., Teran, H., Dennis, M., Singh, S., 2005. Drought resistance, water use efficiency and nutrient uptake by old and new dry bean cultivars. *Annu. Rep. Bean Improv. Coop.* 48, 144–145.

Mukeshimana, G., Lasley, A. L., Loescher, W. H., and Kelly, J. D. (2014). Identification of shoot traits related to drought tolerance in common bean seedlings. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 139, 299–309.

Ntatsi, G., Egea Gutiérrez-Cortines, M., Karapanos, I., Barros, A., Weiss, J., Balliu, A., et al. (2018). The quality of leguminous vegetables as influenced by preharvest factors. *Sci. Hortic.* 232, 191–205. doi: 10.1016/j.scienta.2017.12.058

- ODEPA. (2020). https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/cultivosRegional_22.04.2020.xls (Accessed on October 30, 2020).
- Padhi, E. M. T., & Ramdath, D. D. (2017). A review of the relationship between pulse consumption and reduction of cardiovascular disease risk factors. *Journal of Functional Foods*, 38, 635-643. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.03.043>
- Paredes, M., Becerra, V. & Tay, J. (2009). Inorganic Nutritional Composition of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Genotypes Race Chile. *Chilean journal of agricultural research*, 69(4), pp. 486-495.
- Paredes, M., Becerra, V., Tay, J., Blair, M., & Bascur, G. (2010). Selection of a Representative Core Collection from the Chilean Common Bean Germplasm. *Chilean journal of agricultural research*, 70(1), pp. 3-15.
- Paredes, M., Gepts P. (1995) Extensive introgression of Middle American germoplasm into Chilean common bean cultivars. *Genetic Resources and Crop Evolution* 42:29-41.
- Paredes, M., Becerra, V., & Tay, J. (2009). Inorganic nutritional composition of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes race Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 69(4), 486-495.
- Paredes, M., Tay, J., Bascur, G, & Singh, S. (1998). Estudio de heredabilidad y avance genético en frejoles chilenos. *Agricultura técnica (CHILE)*, 58(2), pp. 116-122.
- Pinheiro, A.; Ivanovic, C.; Rodríguez, L., 2018. Legume consumption in Chile: Perspectives and challenges. *Revista Chilena de Nutrición* 45, 14–20.
- Phytozome.net (2014) *Phaseolus vulgaris* v1.0. DOE-JGI and USDANIFA. <http://www.phytozome.net/>. (Accessed on July 21, 2020)

- Ramdath, D., Renwick, S., & Duncan, A. M. (2016). The Role of Pulses in the Dietary Management of Diabetes. *Canadian Journal of Diabetes*, 40(4), 355-363. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcjd.2016.05.015>
- Razavi, S. M. A., Bostan, A., & Rezaie, M. (2010). Image processing and physico-mechanical properties of basil seed (*Ocimum basilicum*). *Journal of Food Process Engineering*, 33(1), 51-64. doi:10.1111/j.1745-4530.2008.00259.x
- Roy, F., Boye, J. I., & Simpson, B. K. (2010). Bioactive proteins and peptides in pulse crops: Pea, chickpea and lentil. *Food Research International*, 43(2), 432-442. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2009.09.002>
- Sadzawka, A., Carrasco, M., Demanet, R., Flores, H., Grez, R., Mora, M., Neaman, A., 2007. Métodos de análisis de tejidos vegetales, Segunda Edición. ed, Serie Actas INIA. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago de Chile.
- Salazar, O., Casanova, M., Nájera, F., Contreras, A., Tapia, Y., 2020. Net Nitrogen Mineralisation in Maize-Cover Crop Rotations in Mediterranean Central Chile. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 20, 1042–1050. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00191-4>
- Sant´Ana, E.V.P., dos Santos, A.B., da Silveira, P.M., 2011. The efficiency of use of nitrogen applied in top dressing in irrigated bean. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15(5), 458-462. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000500004>
- Satriani, A., Loperte, A. & Soldovieri, F. (2015). Integrated geophysical techniques for sustainable management of water resource. A case study of local dry bean versus commercial common bean cultivars. *Agricultural Water Management*, 162, pp. 57–66.
- Schmutz J, McClean PE, Mamidi S, Wu GA, Cannon SB, Grimwood J, Jenkins J, Shu S, Song Q, Chavarro C, Torres-Torres M, Geffroy V, Moghaddam SM, Gao D, Abernathy B, Barry K, Blair M, Brick MA, Chovatia M, Gepts P, Goodstein DM,

- Gonzales M, Hellsten U, Hyten DL, Jia G, Kelly JD, Kudrna D, Lee R, Richard MMS, Miklas PN, Osorno JM, Rodrigues J, Thareau V, Urrea CA, Wang M, Yu Y, Zhang M, Wing RA, Cregan PB, Rokhsar DS, Jackson SA (2014) A reference genome for common bean and genome-wide analysis of dual domestications. *Nat Genet* 46:707–713.
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature methods*, 9(7), 671-675. doi:10.1038/nmeth.2089
- Schwember, A.R., Carrasco, B., Gepts, P. 2017. Unraveling agronomic and genetic aspects of runner bean (*Phaseolus coccineus* L.). *Field Crops Research* 206:86-94.
- Sezen, S. M., Yazar, A., Akyildiz, A., Dasgan, H. Y., & Gencel, B. (2008). Yield and quality response of drip irrigated green beans under full and deficit irrigation. *Scientia Horticulturae*, 117(2), 95-102. doi:https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.03.032
- Singh, S., Gepts, P. & Debouck, D. (1991). Races of common bean (*Phaseolus vulgaris*, Fabaceae). *Economic Botany* 45(3), pp. 379-396.
- Singh SP (2005) Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). In: Singh RJ, Jauhar PP (eds) Genetic resources, chromosome engineering, and crop improvement: grain legumes, vol 1. CRC Press, USA
- Singh NP, Pratap A (2011) Food Legumes for Nutritional Security and Health Benefits. En: Singh U, et al. (Eds.,) Biofortification of Food Crops. Springer India, New Delhi, p. 41-50.
- Soil Survey Staff (2014) Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

- Sugita M, Matsuno A, El-Kilani RM, Abdel-Fattah A, Mahmoud MA (2017) Crop evapotranspiration in the Nile Delta under different irrigation methods. *Hydrol. Sci. J. Des Sci. Hydrol.*, 62 (10):1618-1635
- Tay, J., González, J., Sánchez, C. & Valenzuela, A. (2012). Producción Moderna y Competitiva de Poroto. Informativo N°118. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Centro regional de investigación Quilamapu, Chillán, Chile. Available at: <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/informativos/NR39232.pdf> (Accessed on May 15, 2020)
- Tay, K. & Tay, J. (2018). 50 variedades de leguminosas de grano en 53 años de vida en INIA. *Tierra adentro*, 110, pp. 4-9.
- Teasdale, J.R., Frank, J.R., 1983. Effect of Row Spacing on Weed Competition with Snap Beans (*Phaseolus vulgaris*). *Weed Sci.* 31, 81–85. <https://doi.org/10.1017/S0043174500068582>
- Terán, H. & Singh, S. (2002). Comparison of Sources and Lines Selected for Drought Resistance in Common Bean. *Crop Science*, 42(1), pp. 64-70.
- Trucchi E, Benazzo A, Lari M, Iob A, Vai S, Nanni L, Bellucci E, Bitocchi E, Raffini F, Xu C, Jackson SA, Lema V, Babot P, Oliszewski N, Gil A, Neme G, Michieli CT, De Lorenzi M, Calcagnile L, Caramelli D, Star B, de Boer H, Boessenkool S, Papa R, Bertorelle G., 2021. Ancient genomes reveal early Andean farmers selected common beans while preserving diversity. *Nature Plants* doi: 10.1038/s41477-021-00848-7
- Tsai SM, Bonetti R, Agbala SM, Rossetto R (1993) Minimizing the effect of mineral nitrogen on biological nitrogen fixation in common bean by increasing nutrient levels. *Plant Soil* 152:131–138.

- Tunde-Akintunde, T. Y., & Akintunde, B. O. (2004). Some Physical Properties of Sesame Seed. *Biosystems Engineering*, 88(1), 127-129. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.01.009>
- Wilker, J.L., Navabi, A., Rajcan, I., Marsolais, F., Hill, B., Torkamaneh, D., Pauls, K.P., 2019. Agronomic performance and nitrogen fixation of heirloom and conventional dry bean cultivars under low-nitrogen field conditions. *Front. Plant Sci.* 10, 952.
- Xia, M.Z., 1997. Effects of soil drought during the generative development phase on seed yield and nutrient uptake of faba bean (*Vicia faba*). *Aust. J. Agric. Res.* 48, 447–452. <https://doi.org/10.1071/a96003>
- Yao,Z.Y., Zhang,D.B., Liu,N., Yao,P.W., Zhao,N., Li,Y.Y., Zhang,S.Q., Zhai,B.N., Huang, D.L., Wang,Z.H., et al., 2019. Dynamics and sequestration potential of soil organic carbon and total nitrogen stocks of leguminous green manure-based cropping systems on the Loess Plateau of China. *Soil Till Res.* 191:108–116. doi:10.1016/j.still.2019.03.022.
- Zacarías, I., Bascur, G., Guzmán, E. & Yáñez, E. (1991). Evaluación química y biológica de variedades tradicionales y mejoradas de frejoles (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agricultura técnica (CHILE)*, 51(3), pp. 262-266.

CAPÍTULO IV

Severe outbreak of *Fusarium* wilt on common beans (*Phaseolus vulgaris*) caused by *Fusarium oxysporum* in the Maule Region, central Chile

Gonzalo A. Díaz^{1*}, Ricardo A. Cabeza², Ramón Amigo², Elizabeth Llancamil³, Osvaldo Montenegro³, Paulina González¹, Adrián Váldez¹, Mauricio Lolas¹ and Enrique Ferrada³

¹Laboratorio de Patología Frutal, Departamento de Producción Agrícola, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Talca. ²Laboratorio de Nutrición Vegetal, Departamento de Producción Agrícola, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Talca. ³Laboratorio de Fitopatología, Instituto de Producción y Sanidad Vegetal, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

*Corresponding author: Dr. Gonzalo A. Díaz (g.diaz@utalca.cl)

Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is an important grain legume cultivated worldwide as food for humans and livestock (Schwartz et al., 2005). Common beans in central Chile reach up to 3,893 ha from which 1,069 ha are located in the Maule region. Common bean is produced by small farmers who have limited access to fertilization, technical irrigation, and crop protection. In spring 2018, bean plants initially showed a slight yellowing and premature senescence 50 days after sowing (das) until showing wilting symptoms (70 -100 22 das) in Curepto fields (35 05'S; 72 01'W), Maule region. The basal part of affected plants displayed internal reddish-brown discoloration of the vascular tissues. Based on the plant external symptoms, we estimated an incidence between 15% and 45% in bean fields. Nine symptomatic plants were collected, and surface washed with sterile water and disinfested with 75% ethanol (v/v). Then small fragments (5-mm) from damage vascular tissue from each plant were cut and placed on Petri dishes containing PDA acidified with 0.5 ml/l of 92% lactic acid (APDA, 2%). The isolations were incubated for seven days at 25°C. Nine *Fusarium* like isolates from single-spore on APDA (2%) became pale vinaceous, floccose with abundant aerial mycelium and dark vinaceous reverse colony, with a growing rate of 10.8 to 11.6 mm/d at 25°C (Lombard et al., 2019). Phialides were short, singular growing laterally on the mycelium. Macroconidia were hyaline, fusiform with basal foot cells shaped to pointed and apical cells tapered, 2-5 septate, and 28.6 to 47.6 (av. 38.1) µm long x 2.2 to 3.6 (av. 3.1) µm wide. Microconidia were hyaline, oval to ellipsoid, one-celled, and 4.5 to 10.9 (av. 6.1) µm long and 2.2 to 3.3 (av. 2.7) µm wide (n=50 spore). For molecular

identification, three isolates (Curi-3.1, Be-8.1, and Be-11.3) were sequenced using PCR amplification of the partial sequences of beta-tubulin (BT) and translation elongation factor 1- α gene (TEF) (Lombard et al., 2019). NCBI BLAST analysis showed 99 to 100% similarity with sequences (TEF; BT) of strain CPC 25822 of *Fusarium oxysporum*. The maximum-likelihood phylogenetic analysis placed the Chilean isolates in the *F. oxysporum* complex clade. Chilean sequences were deposited into GenBank under accession numbers MW419125, MW419126, MW419127 (TEF) and MW419128, MW419129, MW419130 (BT). Pathogenicity tests (isolates Curi-3.1, Be-8.1, and Be-11.3) were conducted under greenhouse (15-28°C, 85%RH) on healthy bean plants (n=30) cv. Blanco Español INIA cultivated in pots (sand/peat moss/soil) at the University of Talca. Plants that are 30 days-old were inoculated using 200 μ l of conidial suspension (106 conidia/ml) on wounded roots (crown). Control plants (n=10) were similarly inoculated with sterile distilled water. After 45 days, all inoculated plants with *F. oxysporum* isolates developed necrotic lesions on vascular tissue, and chlorosis, and wilting while control plants remained healthy. This experiment was conducted twice. The pathogen was reisolated (100%) from diseased plants and molecularly identified as *F. oxysporum*. To our knowledge, this is the report of a severe outbreak of *F. oxysporum* causing Fusarium yellows in *P. vulgaris* in the Maule region, Chile. Previously, *F. oxysporum* has been reported affecting tomato (Sepúlveda-Chavera et al., 2014) and blueberry in Chile (Moya-Elizondo et al., 2019).

Literature

Schwartz, H., et al., 2005. Compendium of bean diseases (APS Press)

Lombard, L., et al., 2019. *Persoonia* 43:1.

Moya-Elizondo, E., et al., 2019. *Plant Dis.* 103:2669.

Sepúlveda-Chavera, G., et al., 2014. *Plant Dis.* 98:1432.

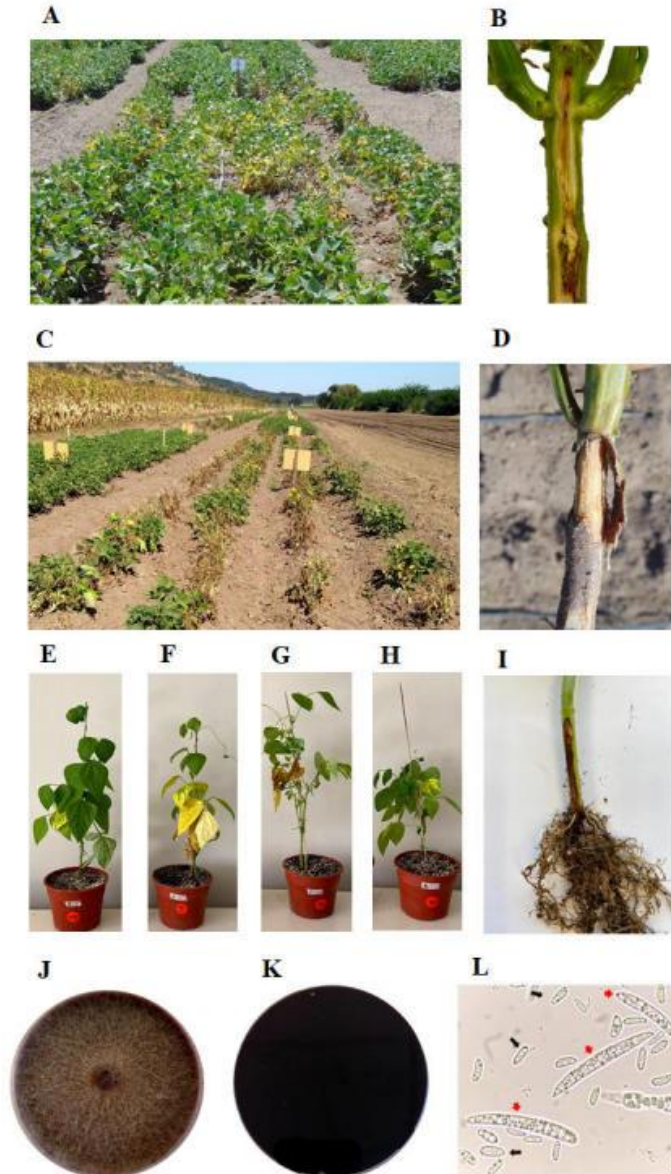


Figure 1. Severe symptoms of Fusarium wilt observed in common bean fields in Curepto, Maule Region. Bean plants with slight yellowing, premature senescence, stunted, and wilting (A, C). Internal reddish-brown vascular tissue in bean plant with Fusarium wilt (B, D). Common bean plant cv. Blanco Español INIA subjected to a Pathogenicity test. Control plant with regular foliage and pod (E). Plants inoculated with *Fusarium oxysporum* isolates Curi-3.1 (F), isolate Be-8.1 (G), and Be-11.3 (H) shown symptoms of chlorotic and yellow leaves and stunted. I, Plant inoculated show reddish-brown necrotic of crown and stem. Upper view of pale vinaceous mycelial growth of 14-day-old at 25°C on APDA media of *F. oxysporum* (Isolate Be8.1) (J). Reverse view (dark vinaceous) of the colony of 14-day-old on APDA of *F. oxysporum* (Isolate Be8.1) (K). Macroconidia (red arrow) and microconidia (black arrow) of *F. oxysporum* (Isolate Be8.1) (L). 178x301mm (96 x 96 DPI)

II.-DISCUSION GENERAL

II.1.- Capítulo I

En Chile, específicamente en el secano costero de la región del Maule, la lenteja es una especie que es cultivada en gran parte por pequeños productores, que basan sus explotaciones en técnicas tradicionales de producción y en el conocimiento transmitido a través de las generaciones.

En el caso del material genético, el programa de mejoramiento de leguminosas de grano de INIA, ha realizado un esfuerzo para liberar variedades de lentejas que sean resistentes a la roya (Peñaloza et al., 2007). Sin embargo, fue un ecotipo local, denominado “de Vega” el que resultó en un aumento del rendimiento de granos y de proteína por unidad de superficie en los tratamientos evaluados en los ensayos de campo. Además, otro ecotipo local, denominado “de Loma” obtuvo una mayor proporción de semillas de calibre sobre > 6 mm, lo cual es considerado como lentejón y está bien valorado en el mercado local.

Como se mostró en el Capítulo I, la lenteja es una especie de baja demanda nutricional, lo que sumado a la capacidad de fijación de N_2 le permite satisfacer en gran medida sus necesidades de N. Así, la fertilización nitrogenada no es necesaria, siendo relevante la práctica de inoculación con rizobios, especialmente cuando el sitio no cuenta con historial previo de siembra de lentejas. Por lo mismo, y dada la tradición lentejera en la comuna de Chanco, la inoculación con bacterias del género *Rhizobium* no tuvo efecto sobre el rendimiento debido a la inoculación natural de los rizobios presentes en el suelo, los cuales contribuyeron a satisfacer la demanda de N por la planta. Para el caso de macronutrientes como el P y K, se debe realizar una dosis de corrección asegurando niveles mínimos suficientes para el correcto desarrollo del cultivo. En general, una dosis de 300 kg ha^{-1} de súper fosfato triple ($46\% \text{ P}_2\text{O}_5$) y 200 kg ha^{-1} de muriato de potasio ($60\% \text{ K}_2\text{O}$), garantizan un buen rendimiento siempre que el suelo mantenga niveles de estos nutrientes sobre 20 ppm y 150 ppm de P y K disponible en el suelo, respectivamente. Por otra parte, en ciertos suelos con drenaje defectuoso es posible que exista toxicidad por Fe y Mn, tema que será tratado a continuación ya que es parte del capítulo II.

Por otra parte, la desinfección de semillas evitó la pérdida temprana de plantas causada por agentes patógenos, principalmente hongos. Esta práctica favorece el establecimiento de plantas y debe ser considerada como una labor esencial al momento de la siembra, para ello, es necesario que el fungicida sea compatible con cepas de rizobios usadas como inoculantes. Existen desinfectantes con capacidad antifúngica que no afectan el proceso de nodulación, como por ejemplo: metalaxil y fludioxonil (Chang et al., 2013).

Desde el punto de vista productivo, futuros ensayos deben apuntar a la mecanización de las labores. En el caso de la siembra, no existe maquinaria adecuada que se adapte a las pequeñas e irregulares superficies sembradas por los agricultores. La siembra mecanizada permitiría y aseguraría una mayor densidad de plantas y una emergencia uniforme. Del mismo modo, la siembra mecánica facilitaría las labores de manejo de malezas. Por otra parte, las labores de cosechas deben tender a la mecanización, dado el costo y escasez de la mano de obra. Por otra parte, se debe tender a la selección de semillas por tamaño y dar valor agregado al producto cosechado (por ej. harinas, separados de proteínas y almidón).

II.2.- Capítulo II

Como se menciona en el Capítulo II, una de las limitantes abióticas de mayor importancia después del estrés hídrico son los desbalances nutricionales, y en el caso especial de la lenteja, la toxicidad por metales. En el capítulo II se muestra que ciertos suelos, con drenaje defectuoso pueden desarrollar condiciones de reducción que facilitan el aumento de la disponibilidad de metales como el Fe y el Mn. El aumento de la disponibilidad de estos metales no está relacionado con una acidificación del suelo propiamente tal, por lo tanto, la corrección del pH del suelo mediante la aplicación de cal agrícola, no solucionaría el problema de fondo. Una alternativa de manejo es aumentar la dosis de N y permitir a la planta un desarrollo de una mayor biomasa, que le permita diluir la concentración de Mn y Fe y además no depender de la fijación de N₂, la cual parece ser específicamente afectada por la mayor concentración de estos metales.

II.3. Capítulo III

Una de las mayores zonas productoras de porotos en Chile se encuentra en la ribera del río Mataquito en las comunas de Hualañé, Licantén y Curepto. Gran parte de los productores

trabajan en pequeñas superficies, pero también existe un número limitado de agricultores que manejan medianas superficies (~20 ha). Los agricultores poroteros han sido asesorados por el programa de leguminosas de INIA, quien ha liberado nuevas variedades y ha puesto a disposición de los agricultores un paquete tecnológico que estos han asimilado. Lo anterior ha traído como consecuencia una mayor producción del cultivo del poroto.

En los ensayos reportados en el Capítulo III, la variedad de poroto tipo tórtola Zorzal presentó los mayores rendimientos y su productividad no fue afectada por una menor dosis N, así como tampoco, por la disminución del agua aplicada. El uso de una fertilización racional, permitió asegurar un alto rendimiento con una dosis de N 30,8% menor al usado tradicionalmente por los agricultores locales. Del mismo modo, la aplicación de riego mediante cintas, logró disminuir en un 46,6% la cantidad de agua utilizada en el riego del poroto, aumentando la eficiencia del uso del agua. La posibilidad de no afectar el rendimiento disminuyendo la cantidad de agua aplicada cobra relevancia frente al actual escenario de cambio climático (IPCC, 2014), permitiendo hacer un uso más racional del agua disponible.

II.4.- Capítulo IV

Según lo reportado en el capítulo IV, el cultivo del poroto puede ser afectado por muerte temprana de las plantas, la cual es causada por *Fusarium oxysporum*. Esta enfermedad fue inicialmente detectada en los primeros ensayos de productividad del poroto realizados en la comuna de Curepto. Inicialmente, se sospechaba del agente causal, aunque no se tenían datos concretos sobre la identidad del patógeno. Mediante ensayos controlados, se logró aislar e identificar morfológicamente y a través de técnicas moleculares el agente causal *Fusarium oxysporum*. Las estrategias de control convencional para este patógeno son limitadas y poco efectivas, por ende, se deben realizar prácticas orientadas a la prevención (Abawi, 1994). Algunas prácticas culturales recomendadas son la siembra hilerada, a porques, prevenir heridas a las plantas durante labores mecánicas y realizar rotaciones con cereales.

En este capítulo, se analizó la susceptibilidad del poroto, la cual resulta ser variable entre cultivares, el grado de virulencia es variable, pero Blanco Español INIA resultó ser más susceptible al ataque de este patógeno. Avanzar hacia la identificación de genes asociados a la resistencia o tolerancia al patógeno, puede representar una alternativa para el mejoramiento

de variedades resistentes a la fusariosis. Sin embargo, existe escasa información respecto a la identificación de genes asociados a la resistencia de esta enfermedad, lo cual puede representar una oportunidad para el avance en estudios de genética y fitopatología.

II.5.- Adopción de las mejoras propuestas.

Dada las características del territorio y de los agricultores, es posible que la introducción de pequeños cambios en el manejo agronómico de los cultivos resulte en una reducción de los costos de producción, mejores rendimientos y por ende, un mayor retorno económico. Por ejemplo, en el África Subsahariana, la corrección de la fertilización resultó en un aumento de la eficiencia del uso del N en el cultivo del maíz, pasando de 17 kg de granos por unidad de N aplicada a 31 kg (Vanlauwe et al., 2011). Similares resultados se han obtenido con el control de malezas. Así, experiencias exitosas apuntan al momento oportuno del control, como también a las rotaciones y a la mínima perturbación del suelo, como prácticas que deben adoptar los agricultores para disminuir las pérdidas asociadas a la competencia por malezas (Thierfelder et al., 2018).

Por otra parte, la introducción de variedades mejoradas que se adapten a condiciones adversas de producción también ha significado un beneficio para los agricultores. En África Oriental, la introducción de variedades de lenteja de ciclo corto ha permitido aumentar los rendimientos, debido a que estas variedades de fenología corta, coinciden con los periodos de mayor disponibilidad hídrica (Ghanem et al., 2015). En la misma línea, la introducción de variedades mejoradas de arroz en África, ha ayudado a aumentar la seguridad alimentaria y ha reducido la pobreza (Arouna et al., 2017).

A nivel mundial, gran parte de los estudios relacionados a la modificación de las prácticas de manejo en pequeñas explotaciones, coinciden en que las tasas de adopción de nuevas tecnologías lamentablemente son bajas. Lo anterior se debe principalmente a la baja escolaridad de los agricultores, el escaso acceso a la información y al capital de inversión, como también, a la falta de políticas públicas que incentiven la adopción (Abebe et al., 2013; Chianu et al., 2012; Ghimire et al., 2015). Por otra parte, las estrategias más promisorias para generar una adopción exitosa son la identificación de los agricultores adoptantes más

probables, la capacitación y asesoría técnica y la difusión de la innovación en el manejo (Läpple et al., 2015; Toma et al., 2018).

III.- CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados alcanzados y bajo las condiciones locales en donde se realizaron los ensayos, se puede concluir que:

En lenteja, bajo las condiciones de campo en las que se estableció el cultivo, no es necesario realizar fertilización nitrogenada adicional de 30 kg N ha⁻¹, adicionalmente la inoculación con bacterias tampoco tuvo un efecto debido al historial del campo, en el que el inoculo se encontraba presente. La desinfección de semillas con carbenzamida y mancozeb mejoró el establecimiento del cultivo, ya que previno la muerte temprana de plantas.

Los ecotipos de lentejas se encuentran adaptados a las condiciones de producción local, lo que permite un mejor desempeño agronómico en comparación a las variedades comerciales.

En porotos, la aplicación de 90 kg de N ha⁻¹ no significó una disminución del rendimiento de grano en comparación a la aplicación de 120 kg de N ha⁻¹. De igual forma, la instalación de un sistema de riego por goteo, con la consecuente disminución del agua aplicada, no afectó la producción ni la calidad de los granos, demostrando ser una práctica aplicable frente a las condiciones actuales de sequía.

El estudio de una de las principales limitantes para el cultivo de la lenteja y el poroto nos permitió comprender:

1) En lentejas, la toxicidad por Fe y Mn responde a condiciones propias del terreno y a la susceptibilidad de la especie, aun así, las limitaciones del campo pueden ser sobrellevadas mediante prácticas agronómicas que mejoren las propiedades físico químicas del suelo que inducen este fenómeno o mediante la fertilización de N que le permiten a la planta “escapar” de esta situación de toxicidad.

2) En porotos, la identificación del agente causal de la fusariosis, *Fusarium oxysporum*, como la identificación de los diferentes grados de virulencia sobre variedades comerciales, abre puertas a nuevos estudios que permitan comprender la genética asociada a la resistencia o tolerancia, características que pueden ser utilizadas en el mejoramiento genético como una respuesta definitiva a esta problemática.

Finalmente, en relación con la adopción de prácticas por parte de los agricultores, es necesario realizar acompañamientos por períodos que garanticen la adopción de las técnicas recomendadas y el apoyo de agricultores innovadores o tractor que motiven a los agricultores vecinos.

IV BIBLIOGRAFÍA

- Abawi, G. S. (1994). Pudriciones radicales. In Problemas de producción del frijol en los trópicos.
- Abbott, L. K., & Murphy, D. V. (2004). Soil Biological Fertility. In Soil Biological Fertility. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6619-1>
- Abebe, G. K., Bijman, J., Pascucci, S., & Omta, O. (2013). Adoption of improved potato varieties in Ethiopia: The role of agricultural knowledge and innovation system and smallholder farmers' quality assessment. *Agricultural Systems*, 122, 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.07.008>
- Acuña, R. (2008). Compendio de fitopatógenos de cultivos agrícolas en Chile (Vol. 369). Santiago, Chile.
- Ahmad, M., McNeil, D. L., Fautrier, A. G., Armstrong, K. F., & Paterson, A. M. (1996). Genetic relationships in *Lens* species and parentage determination of their interspecific hybrids using RAPD markers. 1091–1098.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Dirk, R., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje, 45(1), 46–55. <https://doi.org/10.1590/1983-40632015v4529143>
- Altland, J. E., Buamscha, M. G., & Horneck, D. A. (2008). Substrate pH affects nutrient availability in fertilized douglas fir bark substrates. *HortScience*, 43(7), 2171–2178. <https://doi.org/10.21273/hortsci.43.7.2171>
- Alvarez, E., Viadé, A., Fernández-Marcos, M. L., & Hernández-Nistal, J. (2010). Limestone particle size and liming scheduling influence soil properties and pasture production. *Soil Science*, 175(12), 601–613. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3181fbdfca>

- Amede, T., y Schubert, S. (2003). Mechanisms of drought resistance in grain II: Stomatal regulation and root growth. *26*(2), 137–144.
- Arouna, A., Lokossou, J. C., Wopereis, M. C. S., Bruce-Oliver, S., y Roy-Macauley, H. (2017). Contribution of improved rice varieties to poverty reduction and food security in sub-Saharan Africa. *Global Food Security*, *14*(August 2016), 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.03.001>
- Arumuganathan, K., y Earle, E. D. (1991). Nuclear DNA Content of Some Important Plant Species. *9*(3), 208–218.
- Ashton, F. M., y Monaco, T. J. (1990). *Weed science: Principles and practices*, fourth ed. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2012.00585.x>
- Avola, G., Tuttobene, R., Gresta, F., y Abbate, V. (2008). Weed control strategies for grain legumes. *Agronomy for Sustainable Development*, *28*(3), 389–395. <https://doi.org/10.1051/agro:2008019>
- Bailey, W. A., Wilson, H. P., y Hines, T. E. (2003). Weed Control and Snap Bean (*Phaseolus vulgaris*) Response to Reduced Rates of Fomesafen. *Weed Technology*, *17*(2), 269–275. [https://doi.org/10.1614/0890-037X\(2003\)017\[0269:WCASBP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0890-037X(2003)017[0269:WCASBP]2.0.CO;2)
- Barber, S. A. (1979). Growth requirements for nutrients in relation to demand at the root surface. In *The Soil–Root Interface*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-325550-1.50008-2>
- Bascur, G. (2017). Desarrollo de variedades chilenas de poroto verde y granado para congelado, con alto valor agroindustrial y culinario, para el mercado interno y de exportación, utilizando técnicas biotecnológicas modernas”. Proyecto INNOVA 07-CT9PHT-12.

- Beebe, S. E., Rao, I. M., Cajiao, C., y Grajales, M. (2008). Selection for drought resistance in common bean also improves yield in phosphorus limited and favorable environments. *Crop Science*, 48(2), 582–592. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.07.0404>
- Bøckman, O. C. (1997). Fertilizers and biological nitrogen fixation as sources of plant nutrients: Perspectives for future agriculture. *Plant and Soil*, 194(1–2), 11–14. https://doi.org/10.1007/978-94-011-7113-7_2
- Bogaard, A., Palmer, C., Jones, G., Charles, M., y Hodgson, J. G. (1999). A FIBS approach to the use of weed ecology for the archaeobotanical recognition of crop rotation regimes. *Journal of Archaeological Science*, 26(9), 1211–1224. <https://doi.org/10.1006/jasc.1998.0364>
- Boza, S., Marcos, G., Cortés, M., y Mora, M. (2016). Perfiles basados en actitudes hacia los programas de apoyo público de microempresarios rurales de la zona central de Chile - Profiles based on attitudes toward public support programs of rural micro entrepreneurs of central Chile. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, (Vol. 48, 2).
- Brady, N., y Weil, R. (2004). Elements of the Nature and Properties of Soils. *Journal of Chemical Information and Modeling*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Bromfield, S. M., Cumming, R. W., David, D. J., y Williams, C. H. (1983). Change in Soil Ph, Manganese and Aluminium Under Subterranean Clover Pasture. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 23(121), 181–191. <https://doi.org/10.1071/EA9830181>
- Buruchara, R. A., Pastor-Corrales, M. A., y Scheidegger, U. (1999). Fusarium Wilt Disease Caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *phaseoli* on a Common Bean Cultivar, G 2333, in Rwanda and the Democratic Republic of Congo. *Plant Disease*, 83(4), 397.

- Cárdenas Travieso, R. M., Ortiz Pérez, R. H., Rodríguez Miranda, O., De la Fé Montenegro, C., y Piedra Lamz, A. (2014). Comportamiento agronómico de la lenteja (*Lens culinaris* Medik.) en la localidad de Tapaste, Cuba. *Cultivos Tropicales*, 35(4), 92–99.
- Cerón, I. (1986). Oferta exportable de productos agrícolas: Evolución y perspectivas.
- Chang, K. F., Hwang, S. F., Ahmed, H. U., Gossen, B. D., Turnbull, G. D., y Strelkov, S. E. (2013). Management strategies to reduce losses caused by fusarium seedling blight of field pea. *Canadian Journal of Plant Science*, 93(4), 619–625. <https://doi.org/10.4141/CJPS2012-293>
- Chant, S. R. (2004). Imidazolinone tolerance in lentil (*Lens culinaris* Medik.). University of Saskatchewan Saskatoon (Canada).
- Chianu, J. N., Chianu, J. N., y Mairura, F. (2012). Mineral fertilizers in the farming systems of sub-Saharan Africa. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(2), 545–566. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0050-0>
- Chiou, C. T. (1990). Roles of Organic Matter, Minerals, and Moisture in Sorption of Nonionic Compounds and Pesticides by Soil. In *Humic Substances in Soil and Crop Sciences: Selected Readings* (pp. 111–160). <https://doi.org/10.2136/1990.humicsubstances.c6>
- Choi, H. K., Mun, J. H., Kim, D. J., Zhu, H., Baek, J. M., Mudge, J., ... Cook, D. R. (2004). Estimating genome conservation between crop and model legume species. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(43), 15289–15294. <https://doi.org/10.1073/pnas.0402251101>
- Chowdhury, I. F., Doran, G. S., Stodart, B. J., Chen, C., y Wu, H. (2020). Trifluralin and atrazine sensitivity to selected cereal and legume crops. *Agronomy*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/agronomy10040587>

- CIREN-CORFO. (1983). Descripciones de suelos VII Región. Estudio agrológico. V.1 Provincia de Curicó. (Pub. CIREN N°45 V.1).
- CIREN-CORFO. (1996). Estudio de suelos de secano VII Región. Descripciones de suelos y materiales y símbolos. (Pub. CIREN N°110).
- Ciudad B., C., y Ite D., R. (1994). Disponibilidad de hierro y manganeso en suelos con aireación restringida. 54(2), 199-203.
- Daryanto, S., Wang, L., y Jacinthe, P. A. (2017). Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: A review. *Agricultural Water Management*, 179, 18–33. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.022>
- De Sousa, M. A., de Oliveira, M. M., Damin, V., y Ferreira, E. P. de B. (2020). Productivity and Economics of Inoculated Common Bean as Affected by Nitrogen Application at Different Phenological Phases. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(4), 1848–1858. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00256-4>
- Díaz-Ambrona, C. H., y Mínguez, M. I. (2001). Cereal-legume rotations in a Mediterranean environment: Biomass and yield production. *Field Crops Research*, 70(2), 139–151. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00132-0](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00132-0)
- Díaz, L. M., y Blair, M. W. (2006). Race structure within the Mesoamerican gene pool of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as determined by microsatellite markers. *Theor Appl Genet.*, 143–154. <https://doi.org/10.1007/s00122-006-0417-9>
- Dixon, R., y Kahn, D. (2004). Genetic regulation of biological nitrogen fixation. *Nature Reviews Microbiology*, 2(8), 621–631. <https://doi.org/10.1038/nrmicro954>
- Doyle, J. J., Herendeen, P., Hughes, C., Kenicer, G., Lewis, G., Mackinder, B., Simon, M. F. (2013). Legume phylogeny and classification in the 21st century: Progress,

prospects and lessons for other species-rich clades. *Taxon*, 62(2), 217–248.
<https://doi.org/10.12705/622.8>

Doyle, J., y Luckow, M. (2003). The rest of the iceberg. Legume diversity and evolution in a phylogenetic context. 131(March), 900–910.
<https://doi.org/10.1104/pp.102.018150.groups>

Du, P., Wu, X., Xu, J., Dong, F., Liu, X., y Zheng, Y. (2018). Effects of trifluralin on the soil microbial community and functional groups involved in nitrogen cycling. *Journal of Hazardous Materials*, 353(152), 204–213.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.04.012>

Edel-Hermann, V., y Lecomte, C. (2019). Current status of *Fusarium oxysporum* formae speciales and races. *Phytopathology*, 109(4), 512–530.
<https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-18-0320-RVW>

El-Jaoual, T., y Cox, D. A. (1998). Manganese toxicity in plants. *Journal of Plant Nutrition*, 21(2), 353–386. <https://doi.org/10.1080/01904169809365409>

Endlicher, W. (1988). El Problema de la Erosión del Suelo en la Cordillera de la Costa de la Octava Región. *Revista de Geografía Norte Grande*, 27(15), 11–27.

Erskine, W., Muehlbauer, F., Sarker, A., y Sharma, B. (2009). *The Lentil Botany, Production and Uses*.

Espinoza, N., Guerrero, J., Mera, M., Norambuena, H., Peñaloza, E., Peyrelongue, A., y Soto, M. (1991). Producción de lenteja IX Región. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Espinoza N, N., Diaz S, J., Penaloza H, E., y Zapata R, M. (1992). Tolerancia de lenteja, cv. Araucana-INIA, a los herbicidas fluazifop-butil, haloxfop-metil, quizalofop-etil y setoxidim. *Agricultura Técnica (Santiago)*, 52(2), 149–155.

- Espinoza, S, Ovalle, C., del Pozo, A., Zagal, E., y Urquiaga, S. (2011). Biological fixation of N₂ in mono and polyspecific legume pasture in the humid Mediterranean zone of Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 71(1), 132–139. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392011000100016>
- Espinoza, S., Ovalle, C., Zagal, E., Matus, I., y del Pozo, A. (2015). Contribution of legumes to the availability of soil nitrogen and its uptake by wheat in Mediterranean environments of central Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 75(1), 111–121. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392015000100016>
- Fageria, V. D. (2001). Nutrient interactions in crop plants. *Journal of Plant Nutrition*, 24(8), 126(April 2013), 30607.
- Faiguenbaum, H. (2003). *Labranza, siembra y producción de los principales cultivos de Chile*. Santiago, Chile: Ograma.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2014). *Anuario Estadístico de la FAO*.
- FAOSTAT. (2020). *Cultivos* [Base de datos]. Available at: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> (Accessed on April 20, 2020)
- Faúndez, M., Cerda, R., Pedreros, A., Zapata, N., Palma, J., Fernández, A., y Cerda, S. (2017). Oportunidades para el desarrollo competitivo de las leguminosas de grano seco en Chile.
- Fedoruk, L. K., y Shirtliffe, S. J. (2011). Herbicide Choice and Timing for Weed Control in Imidazolinone-Resistant Lentil. *Weed Technology*, 25(4), 620–625. <https://doi.org/10.1614/wt-d-11-00079.1>
- Ferguson, M. E., Maxted, N., Slageren, M. VAN, y Robertson, L. D. (2000). A e-assessment of the taxonomy of Lens Mill. (Leguminosae , Papilionoideae , Viciae). 41–59.

- Fernández, M. (1983). Fertilización del. Fertilización Del Poroto, Investigación y Progreso Agropecuario La Platina., 35–36.
- Ferreya, R., Sellés, G., y Sellés, I. (2001). Riego deficitario controlado en nogales. Estrategias de riego para enfrentar situaciones de escasez de agua en frutales. Boletín INIA-Instituto de Investigaciones Agropecuarias
- Friesen, G. H., y Wall, D. A. (1986). Tolerance of lentil (*Lens culinaris* Medik) to herbicides. Agriculture Canada, 66, 131–139.
- Gallagher, R. S., Fernandes, E. C. M., y McCallie, E. L. (1999). Weed management through short-term improved fallows in tropical agroecosystems. Agroforestry Systems, 47(1–3), 197–221. <https://doi.org/10.1023/A:1006271614502>
- Gepts, P., Beavis, W. D., Brummer, E. C., Shoemaker, R. C., Stalker, H. T., Weeden, N. E., y Young, N. D. (2005). Legumes as a model plant family. Genomics for food and feed report of the cross-legume advances through genomics conference. Plant Physiology, 137(4), 1228–1235. <https://doi.org/10.1104/pp.105.060871>
- Ghanem, M. E., Marrou, H., Biradar, C., y Sinclair, T. R. (2015). Production potential of Lentil (*Lens culinaris* Medik.) in East Africa. Agricultural Systems, 137, 24–38. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.03.005>
- Ghimire, R., Huang, W. C., y Shrestha, R. B. (2015). Factors Affecting Adoption of Improved Rice Varieties among Rural Farm Households in Central Nepal. Rice Science, 22(1), 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2015.05.006>
- Gibson, A. H., y Nutman, P. S. (1960). Studies on the Physiology of Nodule Formation. 34(96).
- González, J., y Tay, K. (2017). Producción de porotos y garbanzos en el secano costero del Valle del Mataquito.

- Graham, P. H. (1981). Some problems of nodulation and symbiotic nitrogen fixation in *Phaseolus vulgaris* L.: A review. *Field Crops Research*, 4(C), 93–112. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(81\)90060-5](https://doi.org/10.1016/0378-4290(81)90060-5)
- Gregory, P. J., Simmonds, L. P., y Pilbeam, C. J. (2000). Soil Type, Climatic Regime, and the Response of Water Use Efficiency to Crop Management. 92(October), 814–820.
- Guest, C. A., Schulze, D. G., Thompsonb, I. A., y Huber, D. M. (2002). Correlating manganese x-ray absorption near-edge structure spectra with extractable soil manganese. *Soil Science Society of America Journal*, 66(4), 1172–1181. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1172>
- Guglielmetti, H., Tay, J., Paredes, M., Miranda, O., Rojas, C., Rodríguez, N., Ibáñez, M. (1977). Cultivo del poroto en la zona del centro sur. *Instituto de Investigacion Agropecuaria*, 9, 1–9.
- Hamdy, A., y Katerji, N. (2006). *Water crisis in the Arab World: Analysis and solutions*.
- Herridge, D. F., Peoples, M. B., y Boddey, R. M. (2008). Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant and Soil*, 311(1–2), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9668-3>
- Hirzel C., Juan (Ed.) (2011) *Fertilización de cultivos en Chile*. Chillán: Trama Impresores S.A. Colección Libros INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. no. 28
- Honeycutt, C. W., Clapham, W. M., y Leach, S. S. (1996). Crop rotation and N fertilization effects on growth, yield, and disease incidence in potato. *American Potato Journal*, 73(2), 45–61. <https://doi.org/10.1007/BF02854760>
- Hue, N. V., Vega, S., y Silva, J. A. (2001). Manganese toxicity in a Hawaiian Oxisol affected by soil pH and organic amendments. *Soil Science Society of America Journal*, 65(1), 153–160. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.651153x>

- Husson, O. (2013). Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: A transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy. *Plant and Soil*, 362(1–2), 389–417. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1429-7>
- IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. *Parkinsonism and Related Disorders*, 17(2), 130–132. <https://doi.org/10.1016/j.parkreldis.2010.10.009>
- Jackson, M. T. (1989). World crops: Cool season food legumes: In *Phytochemistry* (Vol. 28). [https://doi.org/10.1016/s0031-9422\(00\)97852-x](https://doi.org/10.1016/s0031-9422(00)97852-x)
- Kaneez, F., Hussain, N., Pir, F., y Mehdi, M. (2013). Effect of nitrogen and phosphorus on growth and yield of Lentil (*Lens culnaris*). *Elixir Appl. Botany*, 57(2013), 14323–14325.
- Kay, C. (1998). La cuestión agraria y el campesinado en Chile hoy. *Debate Agrario* 27, 79.
- Konishi, T., y Sasaki, Y. (1994). Compartmentalization of two forms of acetyl-CoA carboxylase in plants and the origin of their tolerance toward herbicides. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 91(9), 3598–3601. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.9.3598>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., y Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Kumar, J., Gupta, S., Gupta, P., Dubey, S., Tomar, R. S. S., y Kumar, S. (2016). Breeding strategies to improve lentil for diverse agro-ecological environments. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 76(4), 530–549. <https://doi.org/10.5958/0975-6906.2016.00071.7>

- Labrada, R., Parker, C., y Caseley, J. C. (1996). Manejo de Malezas para Países en Desarrollo. (Estudio FAO Producción y Protección Vegetal -. In Agriculture Organización. Roma: Estudio FAO producción y protección vegetal 120.
- Ladizinsky, G. (1979). The origin of lentil and its wild genepool. 28, 179–187.
- Ladizinsky, G., Braun, D., Goshen, D., y Muehlbauer, F. J. (1984). The Biological Species of the Genus *Lens* L. *Botanical Gazette*, 145(2), 253–261. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/2474347>
- Läpple, D., Renwick, A., y Thorne, F. (2015). Measuring and understanding the drivers of agricultural innovation: Evidence from Ireland. *Food Policy*, 51(2015), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2014.11.003>
- Latorre, B. (2004). *Enfermedades de las plantas cultivadas (Sexta Edic)*. Santiago, Chile.: Ediciones UC.
- Latorre, B. (2018). *Compendio de las enfermedades de las plantas (Primera ed; Ediciones Universidad Católica de Chile, Ed.)*. Santiago, Chile.: Ediciones UC.
- Lehmann, N., Finger, R., Klein, T., Calanca, P., y Walter, A. (2013). Adapting crop management practices to climate change: Modeling optimal solutions at the field scale. *Agricultural Systems*, 117, 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.12.011>
- Leitao, S., Malosetti, M., Song, Q., Eeuwijk, F., Rubilares, D., y Vaz, M. (2020). Natural variation in Portuguese common bean germplasm reveals new sources of resistance against *Fusarium oxysporum* f. sp. *phaseoli* and resistance-associated candidate genes. *Phytopathology*, 110 : 3, 633–647.
- Lewis, G. P., Schrire, B. D., Mackinder, B. A., Rico, L., y Clark, R. (2013). A 2013 linear sequence of legume genera set in a phylogenetic context - A tool for collections

management and taxon sampling. *South African Journal of Botany*, 89, 76–84.
<https://doi.org/10.1016/j.sajb.2013.06.005>

Llamas, F., y Acevedo, C. (2016). A FONDO Las leguminosas (Leguminosae o Fabaceae): una síntesis de las clasificaciones , taxonomía y filogenia de la familia a lo largo del tiempo. *Revista de Divulgación Científica Editada Por La Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales de La Universidad de León*, 3021, 5–18.

Loux, M. M., Doohan, D., Dobbels, A. F., y Johnson, W. G. (2012). *Weed Control Guide for Ohio and Indiana*. Department of Horticulture and Crop Science Ohio State University Extension.

LPWG, y Group1, T. L. P. W. (2013). Legume phylogeny and classification in the 21st century: Progress, prospects and lessons for other species-rich clades. 62 (December), 217–248. <https://doi.org/10.12705/622.8>

Madariaga, M. (2017). *Virología - Virus en hortalizas: Mosaico del poroto*. Santiago: Ficha Técnica INIA - Programa Sanidad Vegetal. no. 23.

Marschner, H. (1991). Mechanisms of adaptation of plants to acid soils. *Plant and Soil*, 134(1), 1–20. <https://doi.org/10.1007/BF00010712>

Marschner, P. (2012). *Nutrition of Higher Plants Marschner's Mineral*. In Third edition. <https://doi.org/10.1007/s13142-013-0222-3>

Mateo-Box, J. . (2005). *Prontuario de Agricultura Cultivos agrícolas*. In España.

Mayor-Duran, V. M., Raatz, B., y Blair, M. W. (2016). Desarrollo de líneas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) tolerante a sequía a partir de cruces inter acervo con genotipos procedentes de diferentes orígenes (Mesoamericano y Andino). *Acta Agronomica*, 65(4). <https://doi.org/10.15446/acag.v65n4.48680>

- Mckenzie, B. A., y Hill, G. D. (1990). Growth, yield and water use of lentils (*Lens culinaris*) in Canterbury , New Zealand. 309–320.
- Meziadi, C., Blanchet, S., Geffroy, V., y Pflieger, S. (2017). Genetic resistance against viruses in *Phaseolus vulgaris* L.: State of the art and future prospects. *Plant Science*, 265(July), 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.08.009>
- Moore, T. C. (1974). Symbiotic Nitrogen Fixation in Legume Nodules. *Research Experiences in Plant Physiology*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-96168-7>
- Moraghan, J. T., y Mascagni, H. J. (1991). Environmental and Soil Factors Affecting Micronutrient Deficiencies and Toxicities. (4), 371–425. <https://doi.org/10.2136/sssabookser4.2ed.c11>
- Mousavi-Derazmahalleh, M., Bayer, P. E., Hane, J. K., Valliyodan, B., Nguyen, H. T., Nelson, M. N., ... Edwards, D. (2019). Adapting legume crops to climate change using genomic approaches. *Plant Cell and Environment*, 42(1), 6–19. <https://doi.org/10.1111/pce.13203>
- Muehlbauer, F., y McPhee, K. (2005). Lentil (*Lens culinaris* Medik.). In *Genetic resources, chromosome engineering, and crop improvement*. (p. 493).
- Negussie, T. G., y Pretorius, Z. A. (2008). Yield loss of lentil caused by *uromyces viciae-fabae*. *South African Journal of Plant and Soil*, 25(1), 32–41. <https://doi.org/10.1080/02571862.2008.10639892>
- Nwokolo, E., y Smartt, J. (1996). Food and Feed from Legumes and Oilseeds. In *Food and Feed from Legumes and Oilseeds*. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0433-3_15
- ODEPA. (2020). https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/cultivosRegional_22.04.2020.xls (Accessed on October 30, 2020).

- Oerke, E. C. (2006). Crop losses to pests. *Journal of Agricultural Science*, 144(1), 31–43.
<https://doi.org/10.1017/S0021859605005708>
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Íñiguez-Covarrubias, M., y Montero-Martínez, M. J. (2011). Climate change impact on crop development and water requirements. In *Escuela Nacional de Agricultura (Mexico). Colegio de Postgraduados. Agrociencia (Vol. 45)*.
- Olmedilla Alonso, B., Farré Rovir, R., Asensio Vegas, C., y Martín Pedrosa, M. (2010). Papel de las leguminosas en la alimentación actual. *Actividad Dietética*, 14(2), 72–76.
[https://doi.org/10.1016/S1138-0322\(10\)70014-6](https://doi.org/10.1016/S1138-0322(10)70014-6)
- Ortega, A., Moreno, G., y Diez, J. (2015). Fertilización de poroto para Grano Seco. 1–17.
- Oviedo, R., Betancourth, C., Salazar, C., y Chávez, G. (2010). Caracterización del agente causante de un disturbio en frijol perenne (*Phaseolus polyanthus* Greenman) Characterization of causal agent a disturbance in evergreen bean (*Phaseolus polyanthus* Greenman) XXVII(1), 93–103.
- Palacios, D. (2017). Participación del Óxido Nítrico y Nitrato Reductasa en la inhibición por nitrato de la interacción leguminosa-rizobio.
- Peñaloza, E., Tay, J., y France, A. (2007). Calpún-INIA, a large seed size and rust-resistant lentil (*Lens culinaris* Medik.) cultivar. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 14(1), 53–75. <https://doi.org/10.4067/S0365-28072007000100008>
- Peoples, M. B., Brockwell, J., Herridge, D. F., Rochester, I. J., Alves, B. J. R., Urquiaga, S., Jensen, E. S. (2009). The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the

- productivity of agricultural systems. *Symbiosis*, 48(1–3), 1–17. <https://doi.org/10.1007/BF03179980>
- Peoples, M. B., Ladha, J. K., y Herridge, D. F. (1995). Enhancing legume N₂ fixation through plant and soil management. *Plant and Soil*, 174(1–2), 83–101. <https://doi.org/10.1007/BF00032242>
- Peters, R. D., Sturz, A. V., Carter, M. R., y Sanderson, J. B. (2003). Developing disease-suppressive soils through crop rotation and tillage management practices. *Soil and Tillage Research*, 72(2), 181–192. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00087-4](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00087-4)
- Poggio, S. L. (2005). Structure of weed communities occurring in monoculture and intercropping of field pea and barley. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 109(1–2), 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.02.019>
- Pozo L., A. del, y Canto S., P. del. (1999). Áreas agroclimáticas y sistemas productivos en la VII y VIII regiones.
- Rashid, H., Schäfer, H., Gonzalez, J., y Wink, M. (2012). Genetic diversity of rhizobia nodulating lentil (*Lens culinaris*) in Bangladesh. *Systematic and Applied Microbiology*, 35(2), 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2011.11.008>
- Ren, L., Huang, W., y Cannon, S. B. (2019). Reconstruction of ancestral genome reveals chromosome evolution history for selected legume species. *New Phytologist*, 223(4), 2090–2103. <https://doi.org/10.1111/nph.15770>
- Ríos-Núñez, S. (2013). Reestructuración del sector agrario1 en Chile 1975-2010: Entre el proteccionismo del estado y el modelo económico neoliberal. *Revista de Economía e Sociología Rural*, 51(3), 515–533. <https://doi.org/10.1590/S0103-20032013000300006>

- Rochester, I. J., Peoples, M. B., Constable, G. A., y Gault, R. R. (1998). Faba beans and other legumes add nitrogen to irrigated cotton cropping systems. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 38(2), 253–260. <https://doi.org/10.1071/EA97144>
- Rodríguez, N. (2004). Uso adecuado de fertilizantes en porotos. Chillán, Chile: Boletín INIA N°116.
- Saha, A. K., Sarkar, S., y Bhattacharyya, S. (2018). Identification of lentil genotypes resistant to bruchid (*Callosobruchus chinensis* L.) and selection of diverse parental pair. *14(3)*, 136–143.
- Saha, G. C., Sarker, A., Chen, W., Vandemark, G. J., y Muehlbauer, F. J. (2010). Identification of markers associated with genes for rust resistance in *Lens culinaris* Medik. *Euphytica*, 175(2), 261–265. <https://doi.org/10.1007/s10681-010-0187-y>
- Santibáñez Quezada, F. (2017). Atlas agroclimático de Chile, Tomo III Regiones de Valparaíso, Metropolitana, del Libertador Bernardo O'Higgins y del Maule.
- Sato, S., Isobe, S., y Tabata, S. (2010). Structural analyses of the genomes in legumes. *Current Opinion in Plant Biology*, 13(2), 146–152. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.12.007>
- Scagel, R. F., Bandoni, R. J., Maze, J. R., Rouse, G. E., Schofield, W. B., y Stein, J. . (1984). *El reino Vegetal*. 778.
- Schewe, J., Heinke, J., Gerten, D., Haddeland, I., Arnell, N. W., Clark, D. B., Kabat, P. (2014). Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9), 3245–3250. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222460110>
- Schwartz, F., y Gálvez, G. E. (1980). Bean production problems. In *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/180051>

- Seefeldt, S. S., Jensen, J. E., y Fuerst, E. P. (1995). Log-Logistic Analysis of Herbicide Dose-Response Relationships. *Weed Technology*, 9(2), 218–227. <https://doi.org/10.1017/s0890037x00023253>
- Sepúlveda, N. (2014). Evaluación de biofiltros para reducir pérdidas de nitrógeno en períodos de barbecho de suelos cultivados con maíz. <https://doi.org/10.5354/0717-8883.1955.11040>
- Sepúlveda, P. (2000). Transmisión De Virus Por Semillas. Vol. 33 Biblioteca INIA Revista Tierra adentro p. 18-21
- Sepúlveda R., P., y Baherle V., P. (1986). “Marea negra” en lenteja una enfermedad provocada por un desorden nutricional. 20–23.
- Shah, Z., Shah, S. H., Peoples, M. B., Schwenke, G. D., y Herridge, D. F. (2003). Crop residue and fertiliser N effects on nitrogen fixation and yields of legume-cereal rotations and soil organic fertility. *Field Crops Research*, 83(1), 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(03\)00005-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00005-4)
- Sikkema, P. H., Robinson, D. E., Nurse, R. E., y Soltani, N. (2008). Pre-emergence herbicides for potential use in pinto and small red mexican bean (*Phaseolus vulgaris*) production. *Crop Protection*, 27(1), 124–129. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2007.04.017>
- Sikora, R. A., y Greco, N. (1990). Nematode parasites of food legumes. *Plant Parasitic Nematodes in Subtropical and Tropical Agriculture*, 181–235.
- Singh, G., Kaur, H., y Khanna, V. (2014). Short communication Weed management in lentil with post-emergence herbicides. *Indian Journal of Weed Science*, 46(2), 187–189.
- Singh, M., Upadhyaya, H. D., y Singh, I. (2013). Genetic and Genomic Resources of Grain Legume Improvement. (Vol. 1).

- Singh, N., y Singh, G. (2016). Response of lentil (*Lens culinaris* Medik) to phosphorus-A review. *Agricultural Reviews*. <https://doi.org/10.18805/ar.v37i1.9261>
- Singh, S. P., y Voysesst, O. (1997). Taller de Mejoramiento de Frijol Para El Siglo XXI Bases para una Estrategia para América Latina. Internacional, Centro Tropical, De Agricultura.
- Singh, S. P. (Ed. (1999). *Common Bean Improvement in the Twenty-First Century*. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9211-6_13
- Singh, S. P., Debouck, D. G., y Gepts, P. (1988). Razas de frijol común *Phaseolus vulgaris* L. Shree P. Singh, Daniel G. Debouck, y Paul Gepts*.
- Singh, S. P., Gepts, P., y Debouck, D. G. (1991). Races of common bean (*Phaseolus vulgaris*, Fabaceae). *Economic Botany*, 25(45), 379–396. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8454.1986.tb00832.x>
- Singh, S. P., y Schwartz, H. F. (2010). Breeding Common Bean for Resistance to Diseases : A Review. (December), 2199–2223. <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.03.0163>
- Slinkard, A. E., Vandenberg, A., y Holm, F. A. (2007, June 19). Lentil plants having increased resistance to imidazolinone herbicides. Google Patents.
- Smith, M., Kivumbi, D., y Heng, L. K. (2002). Use of the FAO CROPWAT model in deficit irrigation studies.
- Soloneski, S., y Larramendy, M. (2013). Weed and Pest Control - Conventional and New Challenges.
- Soltani, N., Nurse, R. E., Shropshire, C., y Sikkema, P. H. (2011). Weed management in cranberry bean with linuron. *Canadian Journal of Plant Science*, 91(5), 881–888. <https://doi.org/10.4141/cjps2011-018>

- Soltani, N., Shropshire, C., y Sikkema, P. H. (2006). Effects of post-emergence application of bentazon and fomesafen on eight market classes of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Crop Protection*, 25(8), 826–830. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2005.11.011>
- Sparks, D. L. (1995). *Environmental Soil Chemistry: Second Edition*. In *Environmental Soil Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-656446-4.X5000-2>
- Stansell, J. R., y Smittle, D. A. (1980). Effects of irrigation regimes on yield and water use of snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 105(6), 869–873.
- Strasburger, E., Noli, F., Schenck, H., y Schimpe, A. F. W. (2002). *Tratado de Botánica (35° Edición)*.
- Streeter, J. G. (1985). Nitrate Inhibition of Legume Nodule Growth and Activity. *Plant Physiology*, 77(2), 325–328. <https://doi.org/10.1104/pp.77.2.325>
- Tay, Juan U ; France, Andrés; Gerding, Marcos; Kramm, Víctor; Velasco, R. (2000). *Manual de producción de leguminosas de grano y hortícolas*. 88.
- Tay, K., y Tay, J. U. (2018). 50 variedades de leguminosas de grano en 53 años de vida de INIA. 4–9.
- Teasdale, J. R., y Frank, J. R. (1983). Effect of Row Spacing on Weed Competition with Snap Beans (*Phaseolus vulgaris*). *Weed Science*, 31(1), 81–85. <https://doi.org/10.1017/s0043174500068582>
- Thierfelder, C., Baudron, F., Setimela, P., Nyagumbo, I., Mupangwa, W., Mhlanga, B., Gérard, B. (2018). Complementary practices supporting conservation agriculture in southern Africa. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(2). <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0492-8>

- Tinivella, F., Hirata, L. M., Celan, M. A., Wright, S. A. I., Amein, T., Schmitt, A., Gullino, M. L. (2009). Control of seed-borne pathogens on legumes by microbial and other alternative seed treatments. *European Journal of Plant Pathology*, 123(2), 139–151. <https://doi.org/10.1007/s10658-008-9349-3>
- Tivoli, B., y Banniza, S. (2007). Comparison of the epidemiology of ascochyta blights on grain legumes. *European Journal of Plant Pathology*, 119(1), 59–76. <https://doi.org/10.1007/s10658-007-9117-9>
- Toma, L., Barnes, A. P., Sutherland, L. A., Thomson, S., Burnett, F., y Mathews, K. (2018). Impact of information transfer on farmers' uptake of innovative crop technologies: a structural equation model applied to survey data. *Journal of Technology Transfer*, 43(4), 864–881. <https://doi.org/10.1007/s10961-016-9520-5>
- Trigosa, R. (1970). Algunos factores que afectan la fijación simbiótica del nitrógeno. (p. 152).
- Turner, N. C. (1990). Plant water relations and irrigation management. 17, 59–73.
- Valentine, A. J., Benedito, V. A., y Kang, Y. (2018). Legume Nitrogen Fixation and Soil Abiotic Stress: From Physiology to Genomics and Beyond. In *Annual Plant Reviews online* (Vol. 42). <https://doi.org/10.1002/9781119312994.apr0456>
- Van Der Vorm, P. D. J., y Van Diest, A. (1979). Aspects of the Fe-and Mn nutrition of rice plants. *Plant and Soil*, 51(2), 233–246. <https://doi.org/10.1007/bf02232886>
- Vanlauwe, B., Kihara, J., Chivenge, P., Pypers, P., Coe, R., y Six, J. (2011). Agronomic use efficiency of N fertilizer in maize-based systems in sub-Saharan Africa within the context of integrated soil fertility management. *Plant and Soil*, 339(1), 35–50. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0462-7>

- Varshney, R. K., Close, T. J., Singh, N. K., Hoisington, D. A., y Cook, D. R. (2009). Orphan legume crops enter the genomics era! *Current Opinion in Plant Biology*, 12(2), 202–210. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2008.12.004>
- Voysest, O. (2000). Mejoramiento genético del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.): Legado de variedades de América Latina 1930-1999 (p. 220). p. 220.
- Wakrim, R., Wahbi, S., Tahi, H., Aganchich, B., y Serraj, R. (2005). Comparative effects of partial root drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) on water relations and water use efficiency in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). 106, 275–287. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.10.019>
- Wei, X., Hao, M., Shao, M., y Gale, W. J. (2006). Changes in soil properties and the availability of soil micronutrients after 18 years of cropping and fertilization. *Handbook of Environmental Chemistry, Volume 5: Water Pollution*, 91(1–2), 120–130. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.11.009>
- Wojciechowski, M. F. (2003). Reconstructing the phylogeny of legumes (Leguminosae): an early 21st century perspective. *Advances in Legume Systematics, Part 10, Higher Level Systematics*, 5–35.
- Wong, M. M. L., Gujaria-Verma, N., Ramsay, L., Yuan, H. Y., Caron, C., Diapari, M., Bett, K. E. (2015). Classification and characterization of species within the genus *lens* using genotyping-by-sequencing (GBS). *PLoS ONE*, 10(3), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122025>
- Woolley, B. L., Michaels, T. E., Hall, M. R., y Swanton, C. J. (1993). The Critical Period of Weed Control in White Bean (*Phaseolus vulgaris*). *Weed Science*, 41(2), 180–184. <https://doi.org/10.1017/s0043174500076037>
- Yadav, S., Rizvi, A. H., Manohar, M., Verma, A. K., Shrestha, R., Bejjga, G., Bahl, P. N. (2007). Lentil Growers and Production Systems around the World. 415–442.

- Yadav, S. S., McNeil, D. L., y Stevenson, P. C. (2007). Lentil An ancient crop for modern times.
- Yang, J., Hu, Y., y Bu, R. (2006). Microscale spatial variability of redox potential in surface soil. *Soil Science*, 171(10), 747–753.
<https://doi.org/10.1097/01.ss.0000230127.86394.45>
- Zaccagnini, M., Wilson, M., y Oszust, J. (2014). Manual de buenas prácticas para la conservación del suelo, la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos.
<https://doi.org/10.13140/2.1.1820.7045>
- Zahran, H. H. (1999). Rhizobium-legume symbiosis and nitrogen fixation under severe conditions and in an arid climate. *Microbiology and Molecular Biology Reviews: MMBR*, 63(4), 968–989.

V.- ANEXOS

I.- Paramentos del rendimiento temporada 2018/19 ensayo experimental de lentejas en Chanco.

Variedad	Tratamiento	N° de plantas por m lineal	Peso 100 granos (gr)	Biomasa aerea por m lineal (gr)	Granos m lineal (gr)	IC	Rendimiento (qq/ha)
Loma	Control	20	6,71	198,8	53,1	0,29	6,98
Loma	30 N	17	6,60	235,0	49,4	0,21	14,03
Loma	Bacteria	13	6,45	176,3	27,0	0,16	9,27
Vega	Control	20	5,65	297,5	97,4	0,33	30,81
Vega	30 N	13	5,20	271,3	78,2	0,28	22,36
Vega	Bacteria	11	5,69	271,3	88,4	0,33	28,39
S. Araucana	Control	16	6,62	231,3	68,2	0,32	7,90
S. Araucana	30 N	20	6,51	192,5	60,9	0,32	12,60
S. Araucana	Bacteria	13	6,39	158,8	37,5	0,25	11,29
Calpún	Control	15	6,57	143,8	28,3	0,21	14,63
Calpún	30 N	19	6,60	176,3	43,6	0,25	13,23
Calpún	Bacteria	15	6,65	148,8	51,3	0,34	15,32

II.- Paramentos del rendimiento temporada 2018/19 ensayo experimental de porotos bajo la condición de riego tradicional (5400m³/temporada), Curepto.

Variedad	Dosis de Nitrógeno (Kg N/ha)	Riego tradicional (5400 m ³ /temporada)					IC	Rendimiento (qq/ha)
		Biomasa aerea total (gr)	N° de plantas por m linea	N° vainas por planta	granos por m lineal (gr)	N° de granos en 100 gr		
Zorzal	90	608,8	12,8	13,3	347,6	220,0	0,57	42,54
Zorzal	120	587,5	13,3	11,8	313,9	211,5	0,53	44,66
Curi	90	603,8	9,8	34,4	247,5	484,0	0,41	6,05
Curi	120	543,8	10,8	24,8	205,3	523,5	0,38	11,81
B. Español	90	448,8	12,3	9,8	216,4	200,3	0,48	15,23
B. Español	120	412,5	11,8	9,0	179,7	196,0	0,45	12,37
Torcaza	90	580,0	14,8	11,1	279,1	217,3	0,48	35,99
Torcaza	120	492,5	14,8	9,0	233,9	214,3	0,47	38,04

III.- Paramentos del rendimiento temporada 2018/19 ensayo experimental de porotos bajo la condición de riego deficitario (4200m³/ temporada), Curepto.

Variedad	Dosis de Nitrógeno (Kg N/ha)	Riego deficitario (4200 m3/temporada)						IC	Rendimiento (qq/ha)
		Biomasa aérea total (gr)	N° de plantas por m línea	N° vainas por planta	granos por m lineal (gr)	N° de granos en 100 gr			
Zorzal	90	648,8	12,5	13,1	330,7	226,3	0,51	41,40	
Zorzal	120	800,0	12,3	17,0	379,5	221,8	0,48	42,71	
Curi	90	501,3	6,0	32,4	162,6	530,5	0,33	6,94	
Curi	120	541,3	6,5	28,6	175,4	525,5	0,33	11,75	
B. Español	90	513,8	10,0	10,1	250,4	190,3	0,48	13,27	
B. Español	120	526,3	10,3	10,6	222,4	194,0	0,42	17,17	
Torcaza	90	450,0	13,3	8,7	172,2	246,3	0,37	35,15	
Torcaza	120	516,3	13,8	8,7	217,2	222,5	0,41	37,07	

IV.- Resultados análisis de suelo realizados para los experimentos de lentejas en la comuna de Chanco.

Sitio de muestreo	M.O.										
	N ppm	P ppm	K ppm	M.O. (%)	pH	C.E. dS/m	Mn ppm	Zn ppm	Cu ppm	Fe ppm	B ppm
Ensayos Experimentales (2018/19)	11 B	25 MA	315 MA	6,06	5,74 mAC						
PD Loma y Vega (2019/20)	12 B	16 A	361 MA	4,76	5,74 mAC	0,14 S/R	16,70 A	3,42 A	1,24 A	100,08 A	0,74 M
Agricultor 1 (V. Opazo)	13 B	34 MA	224 A	3,45	5,65 mAC	0,059 S/R	16,24 A	3,09 A	1,94 A	134,33 A	0,29 B
Agricultor 2 (F. Pereira)	1 B	11 MA	71 B	1,83	5,83 mAC	0,048 S/R	18,95 A	1,14 A	1,34 A	90,17 A	0,12 MB

Sitio de muestreo	K	Ca	Mg	Na	Suma de Bases
	cmol(+)/K g	cmol(+)/K g	cmol(+)/K g	cmol(+)/K g	cmol(+)/Kg
Ensayos Experimentales (2018/19)	0,81 A	7,18 M	2,84 A	0,12 MB	
PD Loma y Vega (2019/20)	0,92 A	7,87 M	2,73 A	0,14 MB	11,66
Agricultor 1 (V. Opazo)	0,57 A	8,26 A	1,84 A	0,14 MB	10,81
Agricultor 2 (F. Pereira)	0,18 B	5,82 M	3,14 A	0,2 B	9,35

Simbología: MB: Muy Bajo; B: Bajo; M: Medio; A: Alto; MA: Muy Alto; fAC: Fuertemente Acido; mAC: Moderadamente Acido; NEU: Neutro; mAL: Moderadamente Alcalino; fAL: Fuertemente Alcalino; S/R: Sin Riesgo y C/R: Con Riesgo

V.- Resultados análisis de suelo realizados para los experimentos en porotos en la comuna de Curepto.

Sitio de muestreo	N ppm	P ppm	K ppm	M.O. (%)	pH	K	Ca	Mg	Na	Suma de
						cmol(+)/K g	cmol(+)/K g	cmol(+)/K g	cmol(+)/K g	Bases cmol(+)/Kg
Ensayos Experimentales (2018/19)	15 B	13 M	238 A	1,01	6,39 mAC	0,61 A	6,19 M	1,48 A	0,15 MB	
PD (2019/20) y Agricultor 1 (H. Farias)	3 B	40 MA	489 MA	1,46	6 mAC	1,25 A	6,92 M	1,85 A	0,17 MB	10,19
Agricultor 2 (H. Farias)	10 B	23 A	188 A	1,34	5,86 mAC	0,48 A	5,41 M	1,87 A	0,15 MB	7,91
Agricultor 3 (M. Gajardo)	8 B	38 MA	450 MA	2,31	6,13 mAC	1,15 A	8,83 A	2,93 A	0,16 MB	13,07
Agricultor 4 (M. Porra)	6 B	7 B	57 B	0,92	5,65 mAC	0,14 B	5,071 M	2,51 A	0,1 MB	7,83

Simbología: MB: Muy Bajo; B: Bajo; M: Medio; A: Alto; MA: Muy Alto; fAC: Fuertemente Acido; mAC: Moderadamente Acido; NEU: Neutro; mAL: Moderadamente Alcalino; fAL: Fuertemente Alcalino; S/R: Sin Riesgo y C/R: Con Riesgo