

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**“MANEJO DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO PARA
RECUPERAR HUERTOS DE PALTO (*Persea americana* Mill.) EN
ESTADO DE DECAIMIENTO EN CHINCHA”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL
TÍTULO DE INGENIERO AGRÓNOMO**

JUAN ANTONIO DELPERO BARRIOS

LIMA – PERÚ

2023









La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación

(Art. 24 del Reglamento de Propiedad Intelectual)

Document Information

Analyzed document	TSP JUAN ANTONIO DELPERO - versión final - antiplagio.docx (D159085551)
Submitted	2023-02-20 14:27:00
Submitted by	RUBY VEGA RAVELLO
Submitter email	rvega@lamolina.edu.pe
Similarity	8%
Analysis address	rvega.unalm@analysis.arkund.com

Sources included in the report

W	URL: https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm Fetched: 2021-11-04 07:16:13	 1
W	URL: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792011000400369&lng=es&lng... Fetched: 2023-02-20 14:28:00	 4
W	URL: https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/7681 Fetched: 2021-06-16 06:07:32	 3
W	URL: https://www.ons.gov.uk/file?uri=/economy/grossdomesticproductgdp/datasets/gdpmonthlyestimateuk... Fetched: 2023-01-09 15:29:28	 5
SA	Urkund Génesis Taco.docx Document Urkund Génesis Taco.docx (D121673391)	 1
W	URL: https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/ifs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20D... Fetched: 2020-08-19 08:30:53	 1
SA	Taller de Título Mary Mancilla.docx (4).pdf Document Taller de Título Mary Mancilla.docx (4).pdf (D121800613)	 3
W	URL: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-_densidad_aparente.pdf Fetched: 2019-10-16 00:05:42	 1

Entire Document

I. INTRODUCCIÓN

El cultivar 'Hass' es la principal variedad comercial de palta en el mundo y se originó en el huerto de Rudolph G. Hass en la ciudad de La Habra Heights del condado de California en Estados Unidos, a partir de una semilla establecida a principios de los años 20 y registrada en 1935 (Téliz y Mora, 2019). Según ProHass (2022), actualmente, la demanda mundial de la palta sigue en aumento, siendo la variedad 'Hass' la más comercial, por lo que los productores peruanos continúan plantando más áreas con este cultivo. Perú es el principal abastecedor de palta 'Hass' a Europa y el segundo mayor productor y exportador a nivel mundial, exportando en la temporada 2019 un total de 290 106 t de palta 'Hass' y 18 311 t de palta 'verde' (Green Skin), en el 2020 se exportó 367 933 t de 'Hass' y 27 724 t de 'verde' y finalmente en el 2021 los envíos alcanzaron las 483 017 t de 'Hass' y 30 087 t de 'verde'. Todo esto registrado en 38 041 ha en el 2019, el 2020 en 44 128 ha y el 2021 en 50 699 ha. Estos valores arrojan rendimientos poco menores a las 10 t ha⁻¹; sin embargo, existen huertos con rendimientos sobre las 20 t ha⁻¹, pero muchos también por debajo de las 10 t ha⁻¹, siendo el rendimiento potencial del palto 'Hass' sobre las 30 t ha⁻¹. En el Perú ya existen experiencias de 30 t ha⁻¹ a un poco más.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**“MANEJO DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO PARA
RECUPERAR HUERTOS DE PALTO (*Persea americana* Mill.) EN
ESTADO DE DECAIMIENTO EN CHINCHA”**

Juan Antonio Delpero Barrios

Trabajo de suficiencia profesional para optar el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

Sustentado y aprobado ante el siguiente jurado:

.....
Dr. Erick Espinoza Núñez
PRESIDENTE

.....
Dra. Ruby Antonieta Vega Ravello
ASESOR

.....
Dra. Consuelo Cecilia Romero León
MIEMBRO

.....
Ing. Mg. Sc. Braulio La Torre Martínez
MIEMBRO

LIMA - PERÚ

2023

DEDICATORIA

Este estudio está dedicado a mi esposa por ser mi inspiración y compañera de vida, a mis dos hijos por darme la oportunidad de ser padre y motivarme a dar lo mejor de mí, a mis padres por su valentía y amor incondicional y a mis abuelos por enseñarme a creer en mí.

AGRADECIMIENTOS

Mi sincero agradecimiento a la Corporación Frutícola de Chincha S.A.C., por permitirme realizar este Trabajo de Suficiencia Profesional y confiar en mí durante estos siete años de trabajo juntos, en los cuales se logró alcanzar de manera gratificante los objetivos trazados al momento de formar el Departamento Técnico de la Corporación.

Un especial agradecimiento a la Dra. Ruby Vega, mi asesora del Trabajo de Suficiencia Profesional, por su sincera amistad y dedicación durante el desarrollo del mismo y a mis profesores de la Universidad Nacional Agraria La Molina por sus valiosas enseñanzas.

“Nuestras escrituras (no importa a cuál religión pertenezcas), en el judaísmo, el cristianismo, el islam, el hinduismo, el budismo... todas las religiones empiezan sus historias allí: Adán, la Madre Tierra, Humus... Cuentan que los humanos surgieron de la tierra. El suelo es la base de la humanidad. Creo que deberíamos contarles a nuestras comunidades, a nuestra gente, a las religiones: regresen a sus escrituras y aprendan del cuidado de los recursos naturales que todas rezan. No gasten esos recursos, protéjanlos, restáurenlos, asegúrenlos para sus próximas generaciones. Esa debería ser la lección”.

Dr. Rattan Lal

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	5
2.1 Objetivo general	5
2.2 Objetivos específicos	5
III. REVISIÓN DE LITERATURA	6
3.1 Contexto nacional e internacional del palto	6
3.2 Historia, origen y taxonomía del palto	8
3.3 Variedades de palto	9
3.3.1 ‘Hass’ (Guatemalteco x Mexicano)	9
3.3.2 ‘Fuerte’ (Mexicano x Guatemalteco)	10
3.3.3 ‘Zutano’ (Mexicano x Guatemalteco)	11
3.3.4 ‘Bacon’ (Mexicano x Guatemalteco)	11
3.3.5 ‘Nabal’ (raza Guatemalteca)	11
3.3.6 ‘Carmen Hass’ (Guatemalteco x Mexicano)	11
3.3.7 ‘Lamb Hass’ (Guatemalteco x Mexicano)	12
3.3.8 ‘Maluma’ (Guatemalteco x Mexicano)	13
3.4 Ecología del palto	13
3.4.1 Clima	13
3.4.2 Suelos	15
3.5 Relación entre propiedades físicas del suelo y la productividad del palto	18
3.5.1 Textura	18
3.5.2 Estructura	21
3.5.3 Porosidad total: macroporosidad y microporosidad	23
3.5.4 Resistencia mecánica a la penetración	31
3.5.5 Profundidad del suelo	33
3.5.6 Conductividad hidráulica	33
3.5.7 Drenaje	35
3.6 Decaimiento de huertos de paltos: causas y síntomas	36
3.6.1 Principales causas de decaimiento de huertos de paltos	36
3.6.2 Síntomas de decaimiento de huertos de palto	41
3.6.3 Otras causas de decaimiento de huertos	42
3.6.3.1 Salinidad	42

3.6.3.2 Carbonato total y caliza activa	44
3.6.3.3 Materia orgánica	45
3.6.3.4 Temperatura y radiación atmosférica	46
IV. DESARROLLO DEL TRABAJO	47
4.1 Ubicación de los campos de cultivo	47
4.2 Antecedentes encontrados al inicio de la experiencia profesional	48
4.2.1 Antecedentes de la productividad del palto	48
4.2.2 Antecedentes de las condiciones climáticas	48
4.2.2.1 Temperatura máxima	48
4.2.2.2 Temperatura mínima	49
4.2.2.3 Humedad relativa	49
4.2.2.4 Evapotranspiración de referencia (ET _o).....	50
4.2.3 Antecedentes edáficos	51
4.2.3.1 Desuniformidad y estratificación del suelo	51
4.2.3.2 Propiedades químicas del suelo	55
4.2.4 Antecedentes de la calidad del agua de riego	59
4.2.5 Antecedentes de la calibración de los equipos de riego por goteo	61
4.2.6 Antecedentes del estado sanitario de los huertos	62
4.3 Estrategias implementadas que mejoraron la calidad física del suelo	63
4.3.1 Subsulado de post-plantación	63
4.3.2 Incorporación de materia orgánica y la práctica del “mulching”	66
4.3.3 Estrategias de riego que tengan en consideración el balance agua/oxígeno	70
4.3.4 Riegos con fracciones de lavado (FL)	75
4.3.5 Control del tránsito de maquinaria agrícola	76
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	77
5.1 Etapa predictiva de la programación de riego	77
5.1.1 Ejemplo de programación predictiva de riego antes de realizar las estrategias de manejo de suelo (año 2016)	77
5.1.2 Ejemplo de programación predictiva de riego después de realizar las estrategias de manejo de suelo (año 2019 - 2022)	82
5.2 Resultados en la etapa de control de la programación de riego	85
5.3 Resultados de riegos con fracciones de lavado (FL)	86
5.4 Calibración y mantención preventiva del sistema de riego por goteo.....	90
5.5 Relación entre el rendimiento y las estrategias de manejo de las propiedades físicas del suelo	91

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
6.1 Conclusiones	96
6.2 Recomendaciones	97
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de las clases texturales de los suelos, de acuerdo al Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (1938).....	19
Tabla 2: Diámetros de partícula de la fracción mineral del suelo.....	20
Tabla 3: Relación entre las distintas clases texturales y las propiedades del suelo	21
Tabla 4: Tipos de poros de origen biológico presentes en el suelo.....	25
Tabla 5: Algunos sistemas de clasificación de poros en función a su distribución de tamaño.....	28
Tabla 6: Clasificación de los poros en relación a su función	30
Tabla 7: Relación entre el tamaño de poros y la textura, de acuerdo a Schaffer et al. (1989)	31
Tabla 8: Clasificación del suelo respecto a su resistencia mecánica a la penetración	32
Tabla 9: Clasificación de los suelos en base a la profundidad de las raíces	33
Tabla 10: Clases de conductividad hidráulica saturada del suelo	35
Tabla 11: Relación del tamaño de poros con la retención de agua y drenaje	36
Tabla 12: Clasificación de los suelos de acuerdo a su salinidad.....	43
Tabla 13: Valores del umbral de salinidad en algunos frutales adultos según Ayers y Westcot (1976)	44
Tabla 14: Clasificación del suelo respecto a su porcentaje de materia orgánica	45
Tabla 15: Monitoreo de salinidad, temperatura, contenido volumétrico de agua y resistencia a la penetración de suelo (fundo 1), antes de ejecutar las estrategias de manejo de suelo	52
Tabla 16: Monitoreo de salinidad, temperatura, contenido volumétrico de agua y resistencia a la penetración de suelo (fundo 2), antes de ejecutar las estrategias de manejo de suelo	53
Tabla 17: Monitoreo de salinidad, temperatura, contenido volumétrico de agua y resistencia a la penetración de suelo (fundo 3), antes de ejecutar las estrategias de manejo de suelo	54
Tabla 18: Monitoreo de salinidad, temperatura, contenido volumétrico de agua y resistencia a la penetración de suelo (fundo 4), antes de ejecutar las estrategias de manejo de suelo	55
Tabla 19: Resultados del análisis de caracterización de suelo durante el periodo 2010 – 2016.	57
Tabla 20: Resultados del análisis de salinidad de suelo durante el periodo 2010 - 2016	59
Tabla 21: Resultados del análisis químico del agua de riego durante el periodo 2010 – 2016.	61
Tabla 22: Relación entre las propiedades físicas del suelo y sus coeficientes hídricos	74

Tabla 23: Consolidado de las propiedades físicas en suelos de textura franca (periodo 2010 - 2016), antes de ejecutar las estrategias de manejo de suelo.....	78
Tabla 24: Consolidado de las propiedades físicas en suelos de textura franca (periodo 2019 - 2022), después de ejecutar las estrategias de manejo de suelo	82
Tabla 25: Comparativo entre los antecedentes y valores actuales de coeficiente de uniformidad de riego (CU) en base a valores promedios	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Exportación histórica del Perú de palta “Hass” y palta “verde”	7
Figura 2: Exportaciones peruanas de palta “Hass” por destino	7
Figura 3: Relación entre el desarrollo del palto y la macroporosidad del suelo	16
Figura 4: Relación entre la macroporosidad y la compactación del suelo.....	23
Figura 5: Los componentes en volumen en un suelo “ideal” para el crecimiento de las plantas	26
Figura 6: Los componentes en volumen de un suelo compactado.....	27
Figura 7: Limitaciones en el contenido de aire a nivel del suelo según la clase textural	40
Figura 8: Diferencias en el desarrollo del palto a diferentes contenidos de aire en el suelo ..	41
Figura 9: Ubicación de Corporación Frutícola de Chincha S.A.C.....	47
Figura 10: Temperatura máxima (°C) mensual durante el periodo 2018 al 2022	48
Figura 11: Temperatura mínima (°C) mensual durante el periodo 2018 al 2022	49
Figura 12: Humedad relativa (%) mensual durante el periodo 2018 al 2022	50
Figura 13: Evapotranspiración de referencia (mm) promedio diario del mes durante el periodo 2018 al 2022.....	51
Figura 14: Huerto con nivel de obturamiento de goteros severo (50% de coeficiente de uniformidad)	62
Figura 15: Subsulado post-plantación “entre hileras”	64
Figura 16: Subsulado post-plantación “entre plantas”	65
Figura 17: Emisión de raíces nuevas a los 45 días post subsulado “entre plantas”	66
Figura 18: Encostrado superficial del suelo.....	68
Figura 19: Incorporación de vermicompost y “mulch” sobre el camellón en un huerto de plantas adultas	69
Figura 20: Resultados a los 90 días posteriores a la incorporación del vermicompost y “mulch” en un huerto de plantas adultas	69
Figura 21: Incorporación de vermicompost y “mulch” sobre el camellón en plantas en un huerto de plantas en crecimiento	70
Figura 22: Huerto de palto en estado de decaimiento causado por asfixia radicular (8% de macroporosidad)	71
Figura 23: Monitoreo de humedad mediante calicatas en paltos	86

Figura 24: Monitoreo inicial de conductividad eléctrica (dS m^{-1}) mediante calicatas en paltos	88
Figura 25: Monitoreo de conductividad eléctrica (dS m^{-1}) mediante calicatas en paltos después de 3 meses con riegos de lavado de sales	89
Figura 26: Síntomas de toxicidad de hojas de paltos por exceso de cloruros a nivel foliar ...	90

RESUMEN

En el presente documento se describe la experiencia desarrollada en el cultivo de palto (*Persea americana* Mill.), en la provincia de Chincha – Ica, en los campos de la empresa Corporación Frutícola de Chincha S.A.C. En este estudio se da a conocer la importancia de implementar estrategias de mejora de las propiedades físicas del suelo, como parte de la gestión del recurso suelo, junto al impacto positivo que esto genera en la mejora de la aireación del suelo y su relación directa en el aumento de la productividad del palto. Asimismo, en el documento se describe algunas estrategias agronómicas que ayudan a resolver este tipo de problemática y permiten revertir situaciones en huertos en estado de decaimiento, entre las cuales se incluyó al subsolado de post-plantación, el cual se realiza con el objetivo de romper las capas duras encontradas en el suelo en huertos ya establecidos, además de mejorar la distribución del tamaño de poros (incrementando su macroporosidad), su capacidad de difusión de gases y mejorar su capacidad de infiltración, entre otros. También se consideró desarrollar programas de riego que mantengan la relación agua/oxígeno del suelo, el cual también contempla estrategias de monitoreo y control de la humedad del suelo, sin descuidar la correcta calibración de los equipos y la adecuada operatividad del sistema de riego por goteo, y estrategias de incorporación de enmiendas orgánicas al suelo junto a la práctica del “mulching”, y finalmente, se mencionó la importancia del control del tránsito de maquinaria agrícola y su impacto sobre la calidad física del suelo.

Palabras clave: porosidad, compactación, resistencia mecánica, distribución de poros, macroporosidad, aireación

ABSTRACT

This document describes the experience developed in the cultivation of avocado (*Persea americana* Mill.), in the orchards of the agro-export company “Corporación Frutícola de Chincha S.A.C.”, located in the province of Chincha – Ica. This study reveals the importance of implementing strategies to improve the soil’s physical properties as part of the management of the soil resource and its relationship between the impact of the soil aeration capacity and its connection with the productivity of avocado orchards. Likewise, some agronomic strategies are described, which look forward to reversing these problems observed in decayed orchards, like, for example, post-plantation subsoiling, which is carried out with the objectives of breaking the hard layers found in already established orchards, improving soil pore-size distribution (increasing macropores distribution), gas diffusion and soil infiltration rates. It is also considered to maintain a balance between soil moisture and oxygen during watering practices. Besides, it also contemplates soil moisture monitoring, irrigation control, and calibration practices for an adequate operation of the drip irrigation system. Finally, this document includes organic amendments, “mulching” practices, and the importance of controlling the traffic of agricultural machinery and its impact on the physical soil quality.

Key words: porosity, compaction, mechanical resistance, pore distribution, macroporosity, aeration

PRESENTACIÓN

En el presente documento se describe la experiencia desarrollada en el cultivo de palto (*Persea americana* Mill.), en la provincia de Chíncha – Ica, en los campos de palto de la empresa Corporación Frutícola de Chíncha S.A.C., con el objetivo de mejorar la productividad. Los huertos se encontraban enmarcados en un fuerte estado de decaimiento, con rendimientos promedio entre 8.0 - 10.0 t ha⁻¹ (entre los años 2015 y 2017) y presentaban la siguiente sintomatología: hojas angostas e inclinadas hacia el suelo, color de follaje verde amarillento, escasez de raíces, árboles defoliados con exceso de floración, caída abundante de frutos a fines de primavera y/o finales de verano, entre otros descritos en el documento. Se observó que este decaimiento en la productividad, se presentó por lo general a partir del séptimo año de instalación en la mayoría de huertos de textura franca a franco arenoso, mientras que en los suelos franco limosos y franco arcillosos, ocurría al quinto año de plantación. Esto debido a que existen fuertes limitaciones en el suelo, sobre todo en sus propiedades físicas que afectan la condición fundamental para el óptimo crecimiento del palto, como la aireación del suelo, todo esto se verá a detalle en la revisión bibliográfica presentada en el capítulo III.

En el capítulo IV se describe el desarrollo de la experiencia profesional, dentro del cual se inicia describiendo las características edafoclimáticas propias de la zona donde se ubican los huertos de palto y se describe también las estrategias agronómicas realizadas para mejorar la calidad física del suelo; entre ellas, el subsolado de post-plantación, uso de enmiendas orgánicas junto a la práctica del “mulching”, incorporación de programas de riego que mantengan la relación agua/oxígeno del suelo (el cual también contempla estrategias de monitoreo y control de la humedad del suelo, sin descuidar la correcta calibración de los equipos y la adecuada operatividad del sistema de riego por goteo), incorporación de riegos de lavado y el control del tránsito de la maquinaria agrícola y su impacto sobre la calidad física del suelo. El resultado de la implementación de estas estrategias fue el aumento de la productividad de manera significativa, logrando 14.6 t ha⁻¹ en el año 2018, 17.3 t ha⁻¹ en el 2019, 18.5 t ha⁻¹ en el 2020 y finalmente, en el 2021 y 2022, se alcanzó 20.1 y 25.0 t ha⁻¹, respectivamente (con sectores de 35.0 t ha⁻¹). Actualmente el potencial de Chíncha aún no se conoce y se seguirá trabajando en ello.

En el capítulo V se abordan los resultados y discusiones donde se hace el comparativo de las propiedades físicas iniciales versus las propiedades físicas posteriores al desarrollo profesional y se refrenda con la revisión bibliográfica presentada en el capítulo III y finalmente en el capítulo VI se presentan las conclusiones y recomendaciones.

I. INTRODUCCIÓN

El cultivar ‘Hass’ es la principal variedad comercial de palta en el mundo y se originó en el huerto de Rudolph G. Hass en la ciudad de La Habra Heights del condado de California en Estados Unidos, a partir de una semilla establecida a principios de los años 20 y registrada en 1935 (Téliz y Mora, 2019). Según ProHass (2022), actualmente, la demanda mundial de la palta sigue en aumento, siendo la variedad ‘Hass’ la más comercial, por lo que los productores peruanos continúan plantando más áreas con este cultivo. Perú es el principal abastecedor de palta ‘Hass’ a Europa y el segundo mayor productor y exportador a nivel mundial, exportando en la temporada 2019 un total de 290 106 t de palta ‘Hass’ y 18 311 t de palta “verde” (Green Skin), en el 2020 se exportó 367 933 t de ‘Hass’ y 27 724 t de “verde” y finalmente en el 2021 los envíos alcanzaron las 483 017 t de ‘Hass’ y 30 087 t de “verde”. Todo esto registrado en 38 041 ha en el 2019, el 2020 en 44 128 ha y el 2021 en 50 699 ha. Estos valores arrojan rendimientos poco menores a las 10 t ha⁻¹; sin embargo, existen huertos con rendimientos sobre las 20 t ha⁻¹, pero muchos también por debajo de las 10 t ha⁻¹, siendo el rendimiento potencial del palto ‘Hass’ sobre las 30 t ha⁻¹. En el Perú ya existen experiencias de 30 t ha⁻¹ a un poco más.

Frente a este fuerte crecimiento de la industria del palto en nuestro país, se busca tener huertos de alta productividad, aunque existen fuertes limitaciones en el suelo, sobre todo en sus propiedades físicas que afectan la condición fundamental para el óptimo crecimiento del palto, como la aireación del suelo. De acuerdo con Ferreyra et al. (2011), la concentración de aire en el suelo es la base de la productividad del palto porque se relaciona directamente con el oxígeno presente para la respiración de su sistema radicular. La falta de oxígeno en el suelo induce a diferentes trastornos fisiológicos en la planta y alteraciones en el metabolismo de la raíz, los cuales desencadenan en un desequilibrio hormonal muy marcado y finalmente se traduce en una pérdida significativa de la productividad. En los campos en Chincha, la mayoría con suelos de textura franca, la caída de la productividad se presentó por lo general a partir del séptimo año de instalación, mientras que en los suelos de textura franco limoso y franco arcilloso se

observó este comportamiento a partir del quinto año, lo cual puede ser atribuido a una o más causas que pueden ocurrir en simultáneo. Por ejemplo, la compactación del suelo, que resulta de errores en la preparación del terreno en la etapa de pre-plantación, malas prácticas de riego, bajo porcentaje de materia orgánica en los suelos, tránsito continuo de maquinaria agrícola, entre otros. Adicionalmente, tal condición recrea un ambiente favorable para la aparición de ciertos patógenos fungosos degenerativos, en especial *Lasiodiplodia theobromae* y *Phytophthora cinnamomi*, enfermedades comunes en huertos de palto en estado de decaimiento (L. Álvarez, comunicación personal, 21 setiembre del 2022). Kozlowski (1985) señala que la inundación de suelos causa pudrición radicular, comúnmente debido a la *Phytophthora cinnamomi* y a su alta tolerancia a suelos con bajos contenidos de oxígeno y Schaffer et al. (2013) comentan que existen efectos sinérgicos entre la inundación y la pudrición radicular en paltos (*Phytophthora cinnamomi*).

Respecto a la compactación del suelo, este fenómeno está influenciado principalmente por la textura, estructura y contenido de humedad del suelo, mientras más seco el suelo, mayor será su resistencia mecánica a la penetración. Los suelos de textura más fina presentan mayor porosidad total con predominio de microporos, por lo que su capacidad de retención de agua será mayor respecto a los suelos de textura gruesa; por lo tanto, la macroporosidad en los suelos de textura fina será menor y esto podría originar problemas de aireación, especialmente cuando aumentan los fenómenos de compactación de suelos. A su vez, los excesos de humedad, originados frecuentemente por errores de riego, pueden desencadenar problemas de asfixia radicular y alterar la concentración de CO₂, O₂ y etileno en el suelo, afectando directamente el crecimiento y fisiología de la raíz. Por otro lado, el déficit hídrico (menor contenido de humedad en el suelo) favorecerá a la compactación del suelo (Sellés et al., 2012). En algunos huertos de paltos del valle de Chíncha también existen ciertas limitaciones en las propiedades químicas del suelo debido a problemas de salinidad, alcalinización, desbalances catiónicos, etc., pero son de menor impacto al igual que las limitaciones biológicas originadas por una pobre actividad microbiológica en el suelo.

Ferreira et al. (2011) incidieron en que las limitaciones físicas del suelo afectan de sobremanera al cultivo del palto, debido a que este frutal evolucionó en suelos Andisoles (derivados de cenizas volcánicas), los cuales presentan propiedades óptimas para el desarrollo del palto, como por ejemplo, alta macroporosidad (alrededor del 46%), alto contenido de materia orgánica, pH ácido (entre 5.0 y 6.0), entre otros; por ello, las raíces del palto se desarrollaron en presencia de

oxígeno y de allí su susceptibilidad a la falta de este elemento, empezando a presentar síntomas de asfixia radicular cuando se tiene contenidos de aire en el suelo del orden del 20% a menos. Por el contrario, el palto presenta un buen desarrollo cuando se tiene niveles de aire en el suelo cercanos al 30% (mientras que la mayor parte de las especies frutales solo requieren sobre el 15% de macroporosidad). Reynolds et al. (2002) indican que trabajos sustanciales de los últimos 30 años sugieren que para el desarrollo de la mayoría de cultivos, en la porción cercana a la superficie del suelo, se requiere entre 0.10– 0.15 m³ m⁻³ de capacidad de aire (equivalente a 10 a 15%), valores mencionados también por Tormena et al. (2002). Gil et al. (2012) mencionan que el contenido de aire del suelo inferior al 17%, restringe la tasa de difusión de oxígeno a menos de 0.2 µg cm⁻² min⁻¹ y que las raíces del palto dejan de crecer cuando la tasa de difusión de oxígeno en el suelo es inferior a ese valor. Kozlowski (1985) mencionó que es necesario 20% a más de contenido de aire en el suelo para tener un intercambio gaseoso adecuado entre el suelo y la atmósfera.

Bajo este contexto de exportaciones crecientes para el palto ‘Hass’ y de restricciones en el suelo de Chincha que afectan sus rendimientos, la experiencia en el manejo del cultivo ha demostrado que la mejora del contenido y de la circulación del aire en el suelo, además de las propiedades físicas que influyen a esta fase del suelo, favorecen hacia una mayor productividad de los huertos de paltos. Esta recuperación se ha basado en la reconciliación de dos elementos aparentemente opuestos: la necesidad de incrementar la producción agronómica y la necesidad imperativa de mantener la calidad del suelo, minimizando su degradación e incluyendo estrategias de sostenibilidad. Por ello, el presente Trabajo de Suficiencia Profesional muestra la importancia de mejorar las propiedades físicas del suelo y su efecto de mejorar la aireación del suelo sobre el éxito en la productividad del palto. Asimismo, en el documento se describe algunas estrategias agronómicas que ayudan a resolver este tipo de problemática y permiten revertir situaciones de huertos en estado de decaimiento.

Todas estas técnicas agronómicas fueron desarrolladas en los campos de palto que pertenecen a los socios de la Corporación Frutícola de Chincha S.A.C. (FRUCHINCHA), empresa en la que colaboro hace casi siete años a cargo de la dirección técnica de sus campos. Esta empresa está ubicada en la provincia de Chincha, departamento de Ica y está conformada por once socios, los cuales producen paltos, mandarina y uva de mesa. Además, cuenta con una planta de empaque de 14 000 metros cuadrados con tres naves independientes para empacar simultáneamente cítricos, palta o uva y arándanos o granada.

Entre las distintas estrategias presentadas en este documento, se incluye al subsolado de post-plantación, el cual se realiza con el objetivo de romper las capas duras encontradas en el suelo en huertos ya establecidos, además de mejorar la distribución del tamaño de poros (incrementando su macroporosidad), su capacidad de difusión de gases y mejorar su capacidad de infiltración, entre otros beneficios. Otra estrategia consiste en considerar programas de riego que mantengan la relación agua/oxígeno del suelo, el cual también contempla estrategias de monitoreo y control de la humedad del suelo, sin descuidar la correcta calibración de los equipos y la adecuada operatividad del sistema de riego por goteo. Asimismo, se da a conocer los beneficios de la incorporación de enmiendas orgánicas al suelo y la práctica del “mulching”, y finalmente se menciona sobre la importancia del control del tránsito de maquinaria agrícola y su impacto sobre la calidad física del suelo. Adicionalmente, se menciona otras limitaciones encontradas en el suelo de Chíncha, referidas a sus propiedades químicas, tales como presencia de sales, carbonatos de calcio y caliza activa; además de presentar propiedades biológicas deficientes, referidas a su bajo porcentaje de materia orgánica en el suelo (en la mayoría de huertos por debajo del 1%) y pobre actividad microbiológica en el suelo. Todas las estrategias presentadas están al alcance de todo agricultor y parten por conocer las condiciones edafoclimáticas requeridas por el palto, propias de su centro de origen y a una posterior evolución adaptativa.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Dar a conocer las estrategias agronómicas que influyen sobre las propiedades físicas del suelo para recuperar huertos de palto en estado de decaimiento.

2.2 Objetivos específicos

- Presentar las principales causas y los síntomas de un huerto de palto en estado de decaimiento.
- Mostrar el impacto en la producción de un huerto de palto en estado de decaimiento.
- Describir las estrategias agronómicas que mejoran las propiedades físicas del suelo para recuperar huertos de palto en estado de decaimiento.
- Compartir estrategias que mejoran la calidad física del suelo para reducir el impacto de la degradación y contribuyan a su conservación.

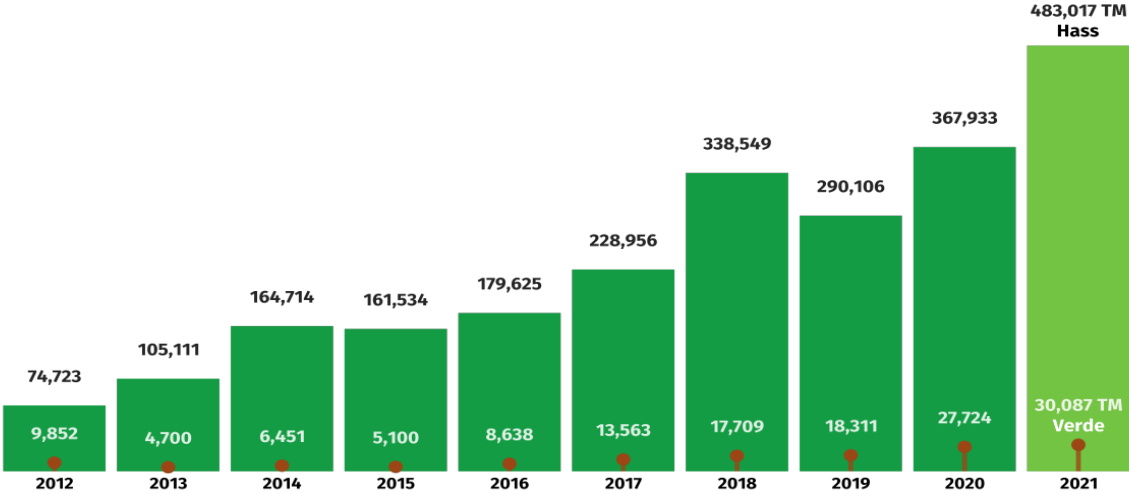
III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Contexto nacional e internacional del palto

Según ProHass (2022), en los últimos años se ha incrementado el consumo de palta ‘Hass’, tanto a nivel nacional como internacional. Esto se debe a que cada vez se reconoce más la calidad nutricional del fruto, siendo Perú el principal abastecedor de palta ‘Hass’ a Europa y el segundo mayor productor y exportador de palta ‘Hass’ a nivel mundial. Los envíos de exportación de palta peruana han mostrado un crecimiento dinámico en los últimos años, siendo Europa el principal mercado de exportación de la palta ‘Hass’ peruana, concentrando alrededor del 57% del volumen el año 2021. En la temporada 2019 se exportó 290 106 t de palta ‘Hass’ y 18 311 t de palta “verde” (Green Skin), el 2020 se exportó 367 933 t de ‘Hass’ y 27 724 t de “verde” y finalmente, en el 2021, los envíos alcanzaron las 483 017 t de ‘Hass’ y 30 087 t de “verde”, tal como se muestra en las Figuras 1 y 2.

Figura 1

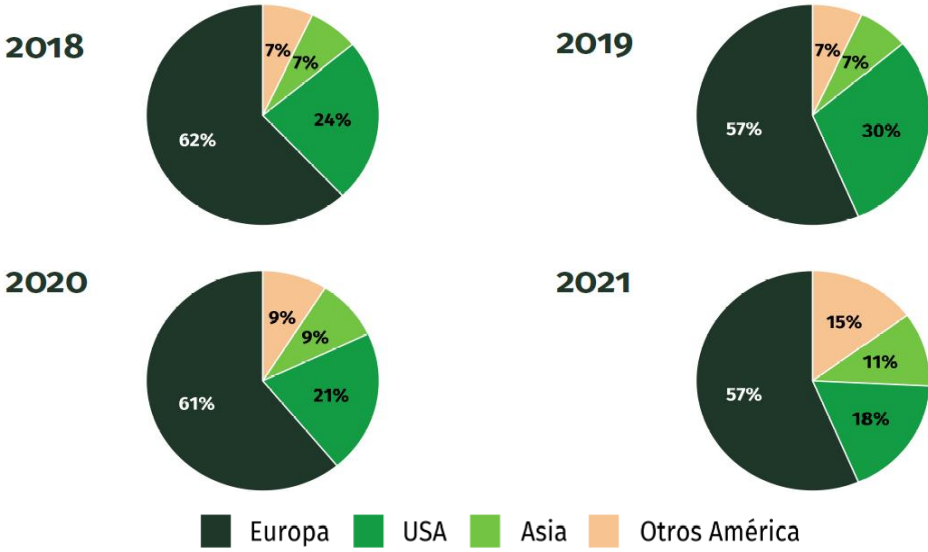
Exportación histórica del Perú de palta ‘Hass’ y palta “verde”



Nota: De *Industria de la palta sigue en ascenso*, por ProHass, 2022
[\(https://prohass.com.pe/2022/07/18/industria-de-la-palta-sigue-en-ascenso/\)](https://prohass.com.pe/2022/07/18/industria-de-la-palta-sigue-en-ascenso/).

Figura 2

Exportaciones peruanas de palta ‘Hass’ por destino



Nota: De *Industria de la palta sigue en ascenso*, por ProHass, 2022
[\(https://prohass.com.pe/2022/07/18/industria-de-la-palta-sigue-en-ascenso/\)](https://prohass.com.pe/2022/07/18/industria-de-la-palta-sigue-en-ascenso/).

3.2 Historia, origen y taxonomía del palto

La evidencia más antigua de consumo de palta (*Persea americana*) data de hace unos 10 000 años atrás en la zona de Puebla, México. La palabra aguacate deriva de “ahuacatl”, que es término del “náhuatl” de la lengua Azteca. El cultivo llega a América del Sur previo a la llegada de los españoles y la primera citación en castellano fue del Sr. Martín Fernández de Enciso (en su obra “Suma de Geografía” escrita en el año 1519), que luego de probarlo en Colombia, lo describió de la siguiente manera: “Cuando se parte para comerlo es de color amarillo: lo que hay dentro es como mantequilla, tiene un sabor delicioso y deja un gusto tan blando y tan bueno que es algo maravilloso” (Namesny et al., 2020).

El palto pertenece a la familia Lauraceae y al orden Laurales y está formado por una amplia familia pantropical que agrupa casi 50 géneros y entre 2 500 a 3 000 especies distintas, la cual en su gran mayoría corresponden a árboles y a algunos arbustos (Lemus et al., 2010).

Según Namesny et al. (2020), se diferencian 3 razas (o tipos botánicos en el palto cultivado), las cuales corresponden a adaptaciones de diferentes condiciones edafoclimáticas. Se tiene: 1) la raza Mexicana (*P. americana* var. *drymifolia*), originaria de tierras altas del centro y sur de México; 2) la raza Guatemalteca (*P. americana* var. *guatemalensis* Williams), que está adaptada a zonas de elevación intermedia en los trópicos americanos y es originaria de los valles centroamericanos y 3) la raza Antillana (*P. americana* var. *americana* Mill.), originaria de zonas bajas tropicales. Al no tener barreras genéticas entre las distintas razas, la mayoría de los cultivares y los portainjertos serán híbridos interraciales. Por ejemplo, las variedades más conocidas en Perú, ‘Hass’ y ‘Fuerte’, son híbridos de Guatemalteca x Mexicana y ambos son los más comunes en regiones con climas no tropicales. Se puede concluir que las razas Mexicana y Guatemalteca, junto a sus híbridos, están más adaptados a los climas mediterráneos y subtropicales, mientras que la raza Antillana está más adaptada a los climas tropicales o semitropicales.

Schaffer et al. (2013) indican que el origen mesoamericano del palto incluye distintos hábitats que están ubicados desde el litoral hasta algunos metros sobre el nivel del mar para el caso de los paltos que se originaron en tierras tropicales bajas (de la raza Antillana) y de los paltos que se originaron en las tierras altas que pertenecen a las razas Mexicana y Guatemalteca (paltos subtropicales) hasta hábitats sobre los 3 000 m de altitud. Por tal motivo, no asombra la gran diversidad genética que tienen los paltos y seguramente deben haber ocurrido migraciones

evolutivas entre las zonas montañosas y las planicies en respuesta a los cambios climáticos ocurridos en épocas remotas.

El palto durante su evolución compitió permanentemente por luz y espacio y bajo estas condiciones ocurrió una selección natural que favoreció la sobrevivencia de árboles de crecimiento rápido y permanente. Debido a esto, el palto es una especie que genéticamente está determinada para crecer continuamente, alcanzando fácilmente dimensiones aproximadas de 12 m de altura y 14 m de diámetro de copa (Lemus et al., 2010).

Finalmente, la variedad ‘Hass’ es la principal variedad comercial de palta en el mundo, originaria de la ciudad La Habra Heights, en el condado de California, Estados Unidos y registrada por Rudolph G. Hass en 1935 a partir de una semilla establecida a principios de los años 20 (Téliz y Mora, 2019).

3.3 Variedades de palto

Las variedades o cultivares de palto que actualmente se conocen se han originado por hibridaciones de distintos materiales trasladados desde su centro de origen (Lemus et al, 2010). Entre las variedades más comerciales se tiene a las siguientes:

3.3.1 ‘Hass’ (Guatemalteco x Mexicano)

De acuerdo a Schaffer et al. (2013), la variedad ‘Hass’ se originó de una mutación espontánea de parentales desconocidos que fue seleccionada por Rudolf Hass en la ciudad La Habra Heights, perteneciente al estado de California en Estados Unidos. Esta variedad tiene una muy buena calidad de pulpa y una mayor productividad y una madurez más tardía respecto a la variedad ‘Fuerte’. Predominantemente tiene genes guatemaltecos, pero con algunos genes mexicanos. El cultivar ‘Hass’ fue patentado en 1935 y en los últimos 50 años se ha convertido en la variedad más importante de climas subtropicales, siendo además la variedad más importante de palto del mundo, habiendo sustituido a la variedad ‘Fuerte’ que tradicionalmente fue considerada el estándar de calidad en el mundo. El palto ‘Hass’ es cultivado principalmente en regiones de clima subtropical fresco y a mayores altitudes en algunas áreas tropicales (por ejemplo, en República Dominicana). En climas que son más cálidos y “estresantes” tiende a producir muchos frutos de bajo calibre (< 200 g) y en climas más frescos tiende a producir frutos de mayor calibre.

Asimismo, los autores mencionan que la variedad ‘Hass’ es un árbol de tamaño mediano a grande que posee un hábito de crecimiento semi-erecto, casi tan ancho como alto, y tiene una producción temprana de cantidad regular a alta. La permanencia por mucho tiempo de la fruta “colgada” en árbol puede incrementar la alternancia bianual de la producción. Esta variedad pertenece al grupo floral “A” y su floración y amarre de frutos es menos sensible a las bajas temperaturas respecto a los cultivares ‘Fuerte’ y ‘Ettinger’, pero sus hojas sí son más susceptibles al frío (sufren daños a partir de -1.1°C). Su fruto es de forma ovalada, aunque la forma del fruto depende de las condiciones de cultivo (climas más cálidos favorecen el desarrollo de frutos de forma más periforme), de tamaño pequeño a mediano y con un peso que oscila entre 140–400 g (promedio de 250-350 g). Su cáscara es medianamente gruesa a gruesa, coriácea y con una textura rugosa y corchosa, con superficie áspera y granulosa, estos gránulos desaparecen cuando se cultiva a gran altitud (por ejemplo, en las tierras altas mexicanas). Las características de postcosecha que contribuyen a la popularidad ‘Hass’ son su excelente capacidad de almacenamiento, transporte, virado de color de la cáscara (de verde a negro, fácil indicador de la maduración del fruto y también permite enmascarar leves imperfecciones de la cáscara) y sabor.

3.3.2 ‘Fuerte’ (Mexicano x Guatemalteco)

Según Schaffer et al. (2013), la variedad ‘Fuerte’ era antiguamente el cultivar comercial líder y mantenía un estándar de excelencia. Es un híbrido de Mexicano x Guatemalteco recolectado por Carl Schmidt en el año 1911 en la ciudad de Atlixco, Puebla en México. Pertenece al grupo floral “B” y es una variedad vigorosa, cuyos árboles son grandes y copas extendidas con hojas que poseen un olor “anisado” al ser machacadas. Esta variedad es menos precoz que la ‘Hass’ y sus rendimientos tienden a ser bajos y erráticos en climas frescos, presentando gran sensibilidad a las bajas temperaturas (su límite de tolerancia al frío es de -2.8°C). Estas son parte de las razones por las cuales esta variedad ha perdido popularidad y ha está siendo reemplazada en California por la variedad ‘Hass’. Su fruto es de tamaño mediano a grande, pesa ente 170–500 g, es de forma periforme y con un cuello distintivo; sin embargo, su forma puede variar desde ser alargada con un cuello largo y angosto, a un formato más redondo con un cuello ancho y corto. Su cáscara es delgada y de color verde, moderadamente brillante y de textura flexible. La fruta tiene maduración temprana con una pulpa de color amarillo pálido y de excelente calidad y puede permanecer mucho tiempo “colgado” en el árbol, pero cuando madura tiene corta vida de anaquel. El almacenamiento por largo tiempo es limitado debido a

que podría desarrollar desórdenes fisiológicos internos conocidos como “mancha de la pulpa”, que ocurren cuando se cultiva con baja disponibilidad de calcio en el suelo.

3.3.3 ‘Zutano’ (Mexicano x Guatemalteco)

Es un híbrido de Mexicano x Guatemalteco que pertenece al grupo floral “B”. Es una planta vigorosa y su copa tiende a ser mediana a alta. Presenta tolerancia al frío y a la salinidad; además, es sensible al encharcamiento y a suelos con problemas de drenaje. El fruto tiene forma de pera, sabor suave y un tamaño de medio a grande (rangos entre 170-400 g). Su piel es delgada, de color verde amarillenta y su pulpa es de color verde pálido, con una textura suave. Al madurar, la piel mantiene su color verde “Green Skin”, al igual que la variedad ‘Fuerte’. Tiene vida moderada en anaquel y la fruta es sensible a la presión; por lo tanto, se debe de tener mucho cuidado durante la cosecha (Portal Frutícola, 2016).

3.3.4 ‘Bacon’ (Mexicano x Guatemalteco)

Originado en Buena Park, California en Estado Unidos. Es un híbrido entre Mexicano x Guatemalteco. Es un árbol erecto y angosto y pertenece al tipo floral “B”. Tiene buena tolerancia al frío y puede soportar -4.4°C. Su fruto pesa entre 198 a 340 g y es de forma ovoide y su cáscara de color verde oscuro, delgada y piel lisa. Su pulpa de buen sabor, de color amarillento hacia verde pálido y de contenido medio de aceite (Téliz y Mora, 2019).

3.3.5 ‘Nabal’ (raza Guatemalteca)

Fue introducida a California en el año 1917. Árbol vigoroso que pertenece al grupo floral “B” con fruto redondo, de tamaño mediano a grande y con un peso a la madurez que fluctúa entre 450 a 550 g. La cáscara es gruesa, ligeramente rugosa y de color verde oscuro. La semilla es proporcionalmente pequeña. Existe un cultivar ‘Nabal’ con frutos de tamaño y peso ligeramente superior, atractivos para el mercado y al que se denomina “Nabal Azul”. La fruta es de buena calidad y ocupa el tercer lugar en las preferencias de los mercados nacionales (Portal Frutícola, 2016).

3.3.6 ‘Carmen Hass’ (Guatemalteco x Mexicano)

Es un mutante puntual de ‘Hass’; por lo tanto, es casi 100% genéticamente idéntico a ‘Hass’. Esta variedad es un híbrido entre Guatemalteco x Mexicano, ya que al ser descendiente de

‘Hass’ resulta ser un híbrido entre ambas razas (I. Hormaza, comunicación personal, 27 de agosto de 2022).

‘Carmen Hass’ fue patentada en Estados Unidos en el año 2000 y con título de derechos de obtentor en México en el año 2011. Esta variedad actualmente está surgiendo como la segunda más cultivada en México y a nivel mundial cada día se incrementa su popularidad. Fue seleccionada por el Sr. Carlos Méndez Vega en el huerto “Cheranguerán” del Municipio de Uruapan, Michoacán en México. Es producto de una mutación de ‘Hass’ que tiene la característica de florecer y cosecharse 2 meses antes que la ‘Hass’ en esa localidad; además, es precoz y menos alternante que la ‘Hass’. ‘Carmen Hass’ tolera mejor el frío que la ‘Hass’, hasta $-2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ por varias horas e inclusive a $-3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 2 o 3 horas. Visualmente es muy parecido a ‘Hass’, pero con leves variantes en el fruto, ya que es un poco más pequeño y de forma menos alargada. Su superficie en California y Sudáfrica se está incrementando; además, se está evaluando en varios países como Australia, Brasil, Chile, Egipto, Israel, Marruecos, Nueva Zelanda, Perú, España, entre otros (Barrientos, 2017).

3.3.7 ‘Lamb Hass’ (Guatemalteco x Mexicano)

La variedad ‘Lamb Hass’ es “nieta” de ‘Hass’ y a la vez ‘Gwen’ es “hijo” de ‘Hass’. La variedad ‘Lamb Hass’ es un híbrido entre Guatemalteco x Mexicano y al ser descendiente de ‘Hass’ resulta ser un híbrido entre ambas razas (I. Hormaza, comunicación personal, 27 de agosto de 2022).

Se originó por mejoramiento genético en la Universidad de California Riverside. ‘Lamb Hass’ es una variedad tipo ‘Hass’ de fruto cuadrado y con textura de piel muy similar a ‘Hass’, pero de mayor calibre que la ‘Hass’. Es de color negro al madurar y semilla de tamaño mediano. Su maduración es bastante tardía, por lo que más que sustituto de ‘Hass’, podría ser una variedad complementaria y entrar en la posttemporada de la ‘Hass’. ‘Lamb Hass’ presenta un hábito de crecimiento erecto y es de madera flexible, donde la fruta crece en racimos al interior del árbol. Su actividad fotosintética es cerca de un 30% más alta que ‘Hass’ y las hojas presentan un mayor contenido de clorofila; sin embargo, al ser una variedad más tardía, presenta una mayor tendencia al añerismo, por lo que el interés en esta variedad es bastante escaso (Gardiazabal, 2017).

3.3.8 ‘Maluma’ (Guatemalteco x Mexicano)

‘Maluma’ es hijo de ‘Hass’ y es un híbrido entre Guatemalteco x Mexicano. Al ser descendiente de ‘Hass’ resulta ser un híbrido entre ambas razas (I. Hormaza, comunicación personal, 27 de agosto de 2022).

Tiene título de derechos de obtentor en Sudáfrica (2014) y en México (2016). Se originó de una selección realizada por el Sr. Andries Joubert en su rancho ‘Maluma’ en la década de los 90 en la ciudad de Levubu (provincia de Limpopo), Sudáfrica. Sus progenitores son desconocidos, pero la variedad tiene características predominantemente de la raza Guatemalteca y Mexicana. Es más precoz y productiva que la ‘Hass’ y tiene una forma de árbol menos vigorosa y de líder central. Es de cáscara rugosa y su fruto cuando madura es de color negro y es de buen sabor. El fruto es de mayor tamaño que ‘Hass’, su peso promedio es de 300 g y tiene un muy buen comportamiento en postcosecha. Actualmente, se está evaluando en Perú, España, Chile, Mozambique, Australia y Nueva Zelanda (Barrientos, 2017).

3.4 Ecología del palto

3.4.1 Clima

Según Gardiazabal (2008), las 3 subespecies (variedades botánicas): americana, guatemalensis, y drimifolia, son razas ecológicas que se desarrollaron en distintas áreas y que por décadas son conocidas como las razas Antillana, Guatemalteca y Mexicana, respectivamente. Tanto la raza Mexicana y Guatemalteca corresponden a paltos que se desarrollaron en los países que tienen estos mismos nombres. Sin embargo, respecto a la raza antillana, actualmente hay evidencias que tuvo su origen a lo largo de la costa del Océano Pacífico y en Centro América; por lo tanto, sería más acertado llamarla raza de las "Tierras bajas". Debido a esto, la adaptación de estas razas a las condiciones ambientales en que se desarrollaron, fueron distinta entre ellas.

Las razas Mexicanas y Guatemaltecas son nativas de los bosques selváticos montañosos, también conocidos como “tierras altas tropicales” y ambas razas se adaptan en distinto grado a diversas áreas subtropicales calurosas o frías, o sea, a latitudes mayores a 23° N o S. Se ha precisado que la raza Mexicana es nativa de las tierras altas entre los 19 a 24° N, es decir, en la frontera entre las tierras subtropicales altas y las semitropicales. La raza más tropical de todas es la Antillano, de las tierras bajas, que se extienden entre las latitudes 8 - 15° N, ubicado en

las tierras bajas de la costa del Pacífico. Por lo tanto, las razas Guatemalteca y Mexicana se originaron en los ambientes de las tierras altas subtropicales y tropicales, con predominancia de lluvias en verano y otoño y con un periodo seco en la época invernal y primavera; en tanto, los paltos Antillanos evolucionaron en los climas de las tierras bajas tropicales, con una distribución de lluvia bastante más uniforme, tal como reportaron Schaffer et al. (2013). Adicionalmente, Namesny et al. (2020) reporta que los niveles de precipitación de las zonas de origen de las razas Mexicana y Guatemalteca oscilan entre 650 a 1 500 mm por año y para el caso de la raza antillana tiene un promedio de 1 800 mm.

Otro aspecto fundamental está referido a la temperatura porque frente a la existencia de primaveras con bajas temperaturas, el proceso de floración y cuajado en ocasiones puede presentar limitaciones que determinan la productividad del cultivo. La variedad 'Hass', durante la etapa de floración y cuajado, tiene como requerimiento valores que superan los 12°C (referido a temperaturas mínimas). Por lo tanto, es muy importante que previo a la plantación del palto, sobre todo en condiciones del subtrópico, se tenga en consideración las condiciones climáticas del lugar. Por otro lado, se han evidenciado problemas de desecación del tejido floral con temperaturas que superan los 35°C y mantenidas por varias horas durante el periodo de floración, afectándose la cuaja y adicionalmente ocurre una disminución en la tasa fotosintética por efecto del cierre estomático que resulta de las condiciones que se alejan de los óptimos respecto al requerimiento del palto (Namesny et al., 2020).

Gardiazabal (2022) sostiene que las temperaturas sobre 30°C en floración y sobre 33°C durante la etapa del desarrollo de los frutos son indeseables debido a que los paltos cierran sus estomas desde que se produce este aumento de temperatura y persiste hasta el día siguiente. Finalmente, si hubiese muchos días seguidos con temperaturas por encima de los 33°C, se produciría un aborto de frutos. Respecto a la humedad relativa, el valor más adecuado está por encima del 60%; contrariamente, un ambiente seco con humedad relativa < 30% en la etapa de floración podría originar problemas de cuajado y caída de frutos.

Namesny et al. (2020) sugieren no plantar paltos en sectores donde se tiene alta intensidad y frecuencia de heladas, a pesar de que los individuos de la raza Mexicana y algunos híbridos con raza Guatemalteca presentan tolerancias que se acercan a los -4°C, pero en eventos de corta duración y baja eventualidad en el tiempo. La raza Guatemalteca presenta tolerancias en un rango menor (-3 a -1°C) y en el extremo de intolerancia a las bajas temperaturas se encuentra la raza Antillana. En Perú, en la zona de la sierra existen plantaciones exitosas de la variedad

‘Hass’ (esta variedad en su mayoría tiene genes de la raza Guatemalteca) en altitudes que superan los 2 000 msnm con inviernos predominantemente fríos, pero con heladas eventuales. Asimismo, el palto en su lugar de origen se desarrolló en convivencia con especies arbóreas de gran tamaño y vigor, adoptando una alta capacidad para crecer y competir.

Respecto a su tolerancia a la radiación solar, Cautín (2019) comenta que en Perú y otros países donde se cultiva paltos se presenta valores muy diferentes a la zona de origen del palto. Se conoce que el flujo de fotones e intercambio gaseoso es exponencial y llega en torno a 1 000 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, que es cuando comienza a detenerse y se presenta consecuencias directas sobre la actividad fotosintética. Por ejemplo, en la zona del norte de Perú, se puede alcanzar un flujo de fotones de 2 000 o 2 500 micromoles durante los días despejados (primavera, verano y a principios de otoño), lo que ocasiona “estrés” en la planta y podría llevar a la plantación a una serie de alteraciones fisiológicas, entre ellas: la deshidratación de flores, disminución de la calidad de la madera debido al daño de sol, saturación lumínica, disminución de su actividad fotosintética y otras situaciones que desencadenan en problemas de productividad, calidad y sostenibilidad del huerto.

El palto presenta un punto de compensación lumínico bajo, producto de desafío de la búsqueda de luz durante su evolución; por ello, cabe precisar que los paltos crecen con mucha velocidad en ambientes muy iluminados debido a esta capacidad “invasora”, siempre y cuando se cumpla con sus demás requerimientos. Finalmente, si se compara el crecimiento anual de una planta joven entre la zona tropical, desértica y subtropical cálida, en las primeras se puede llegar a superar en casi dos veces su desarrollo respecto a las demás (Namesny et al., 2020).

3.4.2 Suelos

El palto evolucionó en suelos Andisoles (derivados de cenizas volcánicas), los cuales presentan propiedades óptimas para su desarrollo, entre ellas: alta macroporosidad (alrededor del 46%), rápido drenaje, alto contenido de materia orgánica, pH ácido (entre 5.0 y 6.0), entre otras. En este tipo de suelos, las raíces del palto se desarrollaron siempre en presencia de oxígeno, de allí su susceptibilidad a la falta de este elemento; por ello, los paltos empiezan a presentar síntomas de asfixia radicular en situaciones de contenido de aire en el suelo de 20% a menos. Por el contrario, el palto presenta un buen desarrollo cuando se tiene niveles de aire en el suelo cercanos al 30%, mientras que la mayor parte de las especies frutales solo requieren sobre el 15% de macroporosidad (Ferreira et al., 2011). Adicionalmente, Gil et al. (2012) reportan que

el contenido de aire del suelo inferior al 17% restringe la tasa de difusión de oxígeno a menos de $0.2 \mu\text{g cm}^{-2} \text{min}^{-1}$, a la cual las raíces del palto dejan de crecer, y Kozlowski (1985) refiere que se necesita de 20% a más de contenido de aire en el suelo para tener un intercambio gaseoso adecuado entre el suelo y la atmósfera. Schaffer (2006) precisa que la falta de oxígeno en el suelo normalmente está referida como hipoxia o anoxia, definiendo a la hipoxia como la reducción del oxígeno, por debajo de sus niveles óptimos, que suele ocurrir en suelo con pobre drenaje y/o durante periodos cortos de inundación; mientras que la anoxia está referida a una falta completa de oxígeno, que ocurre normalmente en suelos que sufren de inundaciones prolongadas. Ambas situaciones son muy negativas para el palto.

En la Figura 3 se observa la relación entre el desarrollo del palto y la macroporosidad del suelo.

Figura 3

Relación entre el desarrollo del palto y la macroporosidad del suelo

**Campo de palto con rendimiento de
25 t ha⁻¹**



Macroporos = 27%

**Campo de palto con rendimiento de
8 t ha⁻¹**



Macroporos = 12%

Nota: Adaptado de *Asfixia radicular en huertos de paltos: manejo del riego y suelo*, por Ferreyra et al., 2011, p. 10, Boletín INIA N° 231. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

Namesny et al. (2020) definen al palto como una especie de gran afinidad por la disponibilidad de oxígeno del suelo y buen drenaje interno, desarrollándose en su lugar de origen con niveles de 46% de macroporosidad. Por otro lado, aquellos de zonas selváticas, se desarrollan en suelos con cantidades de materia orgánica muy altas (sobre el 6 a 8%), en comparación con los suelos de ambientes más secos de la costa peruana o de las laderas de montes en Chile, donde sus valores se registran por debajo del 1.0%.

Ferreya y Sellés (2007) sostienen que para lograr un adecuado equilibrio entre la parte aérea y radicular del palto, se debe de mantener un adecuado equilibrio agua/aire en el suelo. Esto es más complejo de lograr en suelos de textura fina, debido a que cada vez que se riega aumenta el contenido de agua y disminuye la aireación en forma importante (el drenaje de los poros de mayor diámetro ocurre lentamente hasta llegar a capacidad de campo).

Los suelos arenosos tienen una porosidad total menor que los suelos de texturas más finas (francos arcillosos a arcillosos), en ellos predominan los macroporos y la retención de humedad es menor. En cambio, los suelos de textura más fina presentan una mayor porosidad total donde predominan los microporos, por lo que tienen una capacidad de retención de humedad alta. En resumen, en los suelos de textura más fina, la macroporosidad es menor en comparación con los suelos de textura más gruesa, y esto podría originar problemas de aireación del suelo, especialmente cuando aumentan los fenómenos de compactación. El crecimiento radical, además de demandar una adecuada relación suelo-aire, requiere de una baja resistencia mecánica del suelo y es por ello que para mantener estos equilibrios, es mucho más complejo de lograr en suelos de texturas finas, mal estructurados y/o compactados (Ferreya et al., 2011). Asimismo, los valores de resistencia mecánica del suelo (RM) a los cuales se comienzan a presentar limitaciones para el desarrollo radicular de los paltos, se encuentran por encima de 1.0 MPa, mientras que más de 2.0 MPa ya representa una fuerte limitación (R. Ferreya, comunicación personal, 07 de setiembre de 2022).

Namesny et al. (2020) afirman que el palto, principalmente sus razas Mexicana y Guatemalteca, tienen poca tolerancia a la salinidad presente en el suelo, en comparación a la raza Antillana que es más tolerante. El problema que origina la salinidad se vincula principalmente con los elementos sodio (Na) y cloro (Cl), también son importantes las sales carbonatadas que generan problemas de disponibilidad de elementos químicos como zinc (Zn), boro (B), hierro (Fe), entre otros, los que a su vez afectan procesos metabólicos tan importantes como la fotosíntesis cuando sus contenidos son deficientes. La concentración de carbonatos no debe superar el 10%; sin

embargo, existe suelos con niveles que se acercan al 20% como en Israel. Dentro de esta limitación, debe ser considerada la fracción soluble del carbonato de calcio que se conoce como “caliza activa” (nivel crítico de 6%) porque estas partículas muy finas interactúan con el suelo y desencadenan serios problemas en la disponibilidad nutrientes. Todas estas limitaciones se manifiestan en forma importante en las zonas áridas y semiáridas del planeta, donde la menor precipitación impide los fenómenos naturales de lixiviación y la liberación de la condición salina del entorno radicular. Por otro lado, en las zonas templadas lluviosas y tropicales, la pluviometría aporta un volumen importante de agua y mantiene la zona radicular con baja concentración de sales. Con respecto al umbral de tolerancia a la salinidad del palto, Ayers y Westcot (1976) lo reportan en 1.3 dS m^{-1} (referido a la conductividad eléctrica del extracto saturado de suelo) y la mayoría de autores señalan valores entre 1.0 a 1.8 dS m^{-1} . Suelos con conductividad eléctrica de 2.0 dS m^{-1} , provocan que el rendimiento del palto disminuya en 10%.

3.5 Relación entre propiedades físicas del suelo y la productividad del palto

La capacidad de crecimiento y desarrollo de los paltos está estrechamente relacionada con las propiedades físicas de los suelos. Entre ellos se destaca a las siguientes:

3.5.1 Textura

Es el contenido porcentual de arena, limo y arcilla (Tabla 1) y se puede determinar en laboratorio por el método de “Bouyucos”, el cual cuantifica la masa de las partículas; además, también puede ser estimada “in situ” a través de una manera sensorial, al tacto (Ferreya y Sellés, 2013).

La textura es una propiedad muy estable, por ello es difícil de cambiar; sin embargo, se puede modificar sus características inherentes; por ejemplo, aumentar su permeabilidad. Al respecto, Loli (2013) indica que debido a la alta estabilidad de la textura del suelo, se le utiliza como referencia para poder asignar al suelo determinados valores de porosidad, densidad aparente y parámetros de humedad.

En cuanto a las partículas del suelo, las arcillas presentan una gran área superficial, reducido diámetro de partícula ($< 0.002 \text{ mm}$) (Tabla 2) y aspecto coloidal (presencia de cargas), por lo que su porosidad será mayor (especialmente en microporos, los cuales favorecen a una mayor retención de moléculas de agua). A diferencia de las arenas que presentan un área superficial

es reducida, un diámetro mayor de partículas (0.05 a 2.0 mm) (Tabla 2) y un carácter coloidal insignificativo (o no existente), por lo que el agua pasará libremente (Loli, 2013).

Tabla 1

Clasificación de las clases texturales de los suelos, de acuerdo al Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (1938)

Nombres comunes de suelos	Textura	Arenoso	Limoso	Arcilloso	Clase textural
Suelos arenosos	Gruesa	86 – 100	0 – 14	0 – 10	Arenoso
		70 – 86	0 – 30	0 – 15	Franco arenoso
Suelos arenosos	Moderadamente gruesa	50 – 70	0 – 50	0 – 20	Franco arenoso
Suelos francos	Mediana	23 – 52	28 – 50	7 – 27	Franco
		20 – 50	74 – 88	0 – 27	Franco limoso
		0 – 20	88 – 100	0 – 12	Limoso
Suelos francos	Moderadamente fina	20 – 45	15 – 52	27 – 40	Franco arcilloso
		45 – 80	0 – 28	20 – 35	Franco arenoso arcilloso
		0 – 20	40 – 73	27 – 40	Franco limo arcilloso
Suelos arcillosos	Fina	45 – 65	0 – 20	35 – 55	Arcilloso arenoso
		0 – 20	40 – 60	40 – 60	Arcilloso limoso
		0 – 45	0 – 40	40 – 100	Arcilloso

Nota: De Propiedades físicas del suelo, por O. Loli, 2022, Curso de capacitación de la empresa Molinos & CIA.

Tabla 2*Diámetros de partícula de la fracción mineral del suelo*

Fracción	Diámetro mm
Arena muy gruesa	< 2.00 a >1.00
Arena gruesa	1.00 a > 0.5
Arena intermedia	0.5 a > 0.25
Arena fina	0.25 a > 0.10
Arena muy fina	0.10 a > 0.05
Limo grueso	0.05 a > 0.02
Limo fino	0.02 a > 0.002
Arcilla gruesa	0.002 a > 0.0002
Arcilla fina	Menor o igual a 0.0002

Nota: De *Soil survey manual: Handbook 18*, por Soil Science Division Staff, 2017, p. 120, Government Printing Office. USDA.

A través del contenido del tamaño de partículas se puede inferir el comportamiento del suelo; por ello, en la Tabla 3 se detallan los efectos de la relación de las propiedades del suelo y las distintas clases texturales.

Tabla 3*Relación entre las distintas clases texturales y las propiedades del suelo*

Propiedad	Textura del suelo			
	Arcilloso	Limoso	Arenoso	Franco
Infiltración	Baja	Baja	Alta	Media
Aireación	Baja	Baja	Alta	Media
Retención de agua	Alta	Media	Baja	Alta
Erosión	Alta	Alta	Media – Baja	Media
Retención de elementos	Alta	Media – Baja	Baja	Media – Alta
Mineralización de la MO	Baja	Baja	Alta	Media
Facilidad para forma estructura	Alta	Baja	Media – Baja	Media – Alta

Nota: De *Propiedades físicas del suelo*, por O. Loli, 2022, Curso de capacitación de la empresa Molinos & CIA.

3.5.2 Estructura

De acuerdo a Lobo y Pulido (2006) la estructura del suelo es el ordenamiento de las partículas individuales en partículas secundarias o agregados y el espacio poroso que llevan asociado, debido a las interacciones físico-químicas entre las arcillas y los grupos funcionales de la materia orgánica. Esta propiedad se refiere también al tamaño, forma y arreglo de las partículas sólidas y poros, a la continuidad de los poros y a su capacidad para retener y transmitir fluidos y sustancias orgánicas e inorgánicas; pero al mismo tiempo, para asegurar el desarrollo de las raíces. La agregación del suelo puede asumir diferentes modalidades, lo que da como resultado distintos tipos de estructuras y esto a su vez influye sobre las propiedades del suelo (Ferreira y Sellés, 2013). A su vez los agregados son las unidades estructurales del suelo, son grupos de partículas minerales y orgánicas que están ligadas unas a otras y están separadas entre sí por poros o por superficies de debilidad (Lobo y Pulido, 2006). Los agregados de mayor tamaño permitirán una mayor facilidad al paso del agua, manteniendo la predominancia de los macroporos (Loli, 2013).

Desde el punto de vista cualitativo se observa muchas formas básicas de unidades estructurales en los suelos y también desde el punto de vista morfológico: granular, laminar, blocosa (angular

y subangular), prismática, columnar, lenticular y acuñada; además de formas que perdieron su estructura, tales como: granular individual (grano simple) y masivo (masa continua no consolidada). Desde el punto de vista del tamaño se tiene: muy fina, fina, media, gruesa y muy gruesa, mientras que desde el punto de vista del grado de desarrollo de la estructura: sin estructura, débil, medio y fuerte, las cuales refieren al grado de facilidad de separación de partículas, en partículas discretas, debido al manipuleo del suelo (Soil Science División Staff, 2017). La estructura también se puede medir desde el punto de vista cuantitativo mediante índices estructurales, tales como: porosidad total, densidad aparente, distribución de tamaños de poros y la consistencia; también a través de la evaluación de la estabilidad de los agregados (Lobo y Pulido, 2006).

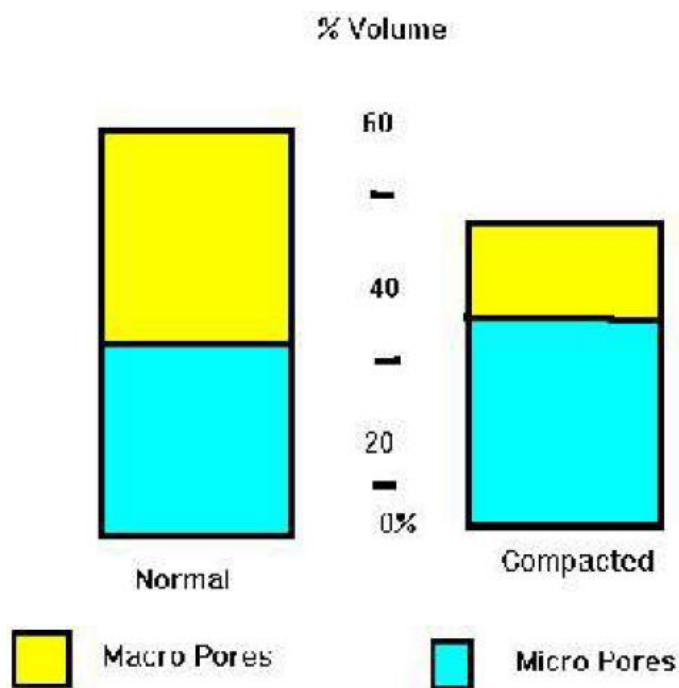
De acuerdo con Loli (2013), la estructura del tipo “laminar” es propia de suelos con problemas de drenaje y compactación, la del tipo “prismático” está presente en suelos con problemas de sales, la de “bloques” es típica de suelos del trópico húmedo y la del tipo “esferoidal” es propia de suelos trabajados. Afirma también, que en los suelos con problemas de sodio o sin elementos cementantes, no existirá presencia de agregados y tampoco existirá en los suelos con alto contenido de arcilla (mayor de 40%), puesto que la alta plasticidad de la arcilla formará una superficie continua. Lobo y Pulido (2006) mencionan que la cuantificación de los cambios a nivel de la estructura del suelo (cualitativos y cuantitativos) son el punto de partida en el análisis de los procesos de degradación física de los suelos y su control.

Ferreira y Sellés (2013) sostienen que el grado de estructuración del suelo es un factor importante en la dinámica del agua, aireación y en la facilidad con la que se desarrollan las raíces en el suelo. La estructura del suelo se puede modificar a través de las labores culturales; sin embargo, el excesivo paso de maquinaria agrícola puede producir serios problemas de compactación. Esta compactación afectará directamente la estructura del suelo y destruirá principalmente los macroporos, donde ocurre el movimiento del agua y aire, lo que limitará el crecimiento y desarrollo radicular y disminuirá la actividad biológica alrededor de las raíces, dado que el aporte de oxígeno será insuficiente y los niveles de dióxido de carbono en el suelo aumentarán. Asimismo, Rabot et al. (2017) precisaron que la estructura controla varios procesos en el suelo, tales como: la retención de agua, infiltración, intercambio gaseoso, materia orgánica del suelo, dinámica de nutrientes, penetración radicular y es el hábitat para una alta cantidad de organismos vivos del suelo, además de tener una alta influencia en la susceptibilidad del suelo frente a los fenómenos de erosión.

En la Figura 4 se muestra didácticamente el efecto de la compactación del suelo sobre los macroporos.

Figura 4

Relación entre la macroporosidad y la compactación del suelo



Nota: De *Características del suelo relacionadas con el riego*, por R. Ferreyra, 2021, p. 95.
Curso internacional de paltos organizado por Red Agrícola.

3.5.3 Porosidad total: macroporosidad y microporosidad

Lal y Shukla (2004) mencionan que los macroporos (funcionalmente conocidos como “poros de transmisión”) se formaron gracias a actividades bióticas, desarrollo de grietas debido a la contracción del suelo, capas de hielo y operaciones de labranza. El contenido de materia orgánica y las arcillas también cumplen un rol importante en la formación y estabilización de los macroporos. Además, los macroporos están muy influenciados por las actividades antropogénicas; por lo tanto, son alteradas por el uso de la tierra y el manejo del suelo. Los mesoporos (funcionalmente conocidos como “poros de retención”) son importantes para el

crecimiento de las plantas y están formados por las microfisuras debido a contracciones del suelo, ciclos de congelamiento y descongelamiento, colapso y/o taponamiento de macroporos por sedimentación y/o precipitación y por desarrollo de pelos radicales, hifas de hongos y efecto de micorrizas. Estos poros están incluidos en la porosidad textural y están influenciados por la distribución del tamaño de partículas, contenido de materia orgánica y mineralogía de la arcilla, estando poco influenciados por el manejo del suelo. Los microporos (funcionalmente conocidos como “poros residuales”) se originaron debido a procesos de contracción de la matriz del suelo y debido al colapso de mesoporos y en ellos impacta menos las labores de manejo de suelo y son biológicamente inactivos, normalmente están siempre llenos con agua, son inaccesible para los microorganismos y estratégicamente útiles para prácticas de secuestro de carbono.

Sellés et al. (2012) indican que, según el tamaño, en el espacio poroso del suelo se distinguen macroporos y microporos. Los macroporos son esenciales para el flujo del aire que suministra el oxígeno, el cual es requerido para el crecimiento de las raíces y para mantener la actividad biológica del suelo, mientras que los microporos retienen el agua en el suelo, la cual puede ser absorbida por las plantas dentro de ciertos límites.

Lal y Shukla (2004) indican, que más que la porosidad total, son el tamaño y la distribución del tamaño de los poros los más importantes para retener y conducir los fluidos dentro y a través del suelo. Los rangos del tamaño de poros en el suelo varían ampliamente, desde 0.003 μm de separación de láminas en partículas arcillosas hasta bioporos, grietas, túneles, etc, de decenas de centímetros de diámetro. Kozlowski (1985) indica que la capacidad de las raíces para penetrar el suelo tiene un efecto significativo en su crecimiento y las raíces individualmente pueden penetrar a través de aquellos poros que tienen un diámetro mayor que el de la raíz y coincide con Hillel (2003), quien señaló que en un suelo compactado, las raíces no son capaces de penetrar por poros más estrechos que sus propias cofias y deberán desplazar a las partículas del suelo para ensanchar los poros, ejerciendo una presión mayor que la propia fuerza mecánica del suelo.

A continuación, se aprecia una amplia diversidad de poros de origen biológico (Tabla 4), los cuales son muy importantes en la transmisión de agua y para que exista un adecuado intercambio gaseoso.

Tabla 4*Tipos de poros de origen biológico presentes en el suelo*

Tamaño medio del poro μm	Importancia biológica
1500 – 50000	Hormigueros y canales
500 – 11000	Agujeros de gusanos
300 – 10000	Raíces primarias de dicotiledóneas
500 – 10000	Raíces nodales de los cereales
100 – 1000	Raíces seminales de los cereales
50 – 100	Raíces laterales de los cereales
20 – 50	Laterales de primer y segundo orden
5 – 10	Raíz del cabello
1000	Raíz más cilindro de pelo de raíz en trébol
30	Capacidad de campo (-10 kPa)
0.5 – 2	Hifas fúngicas
0.2 – 2	Bacteria
0.1	Punto de marchitez permanente (-1500 kPa)

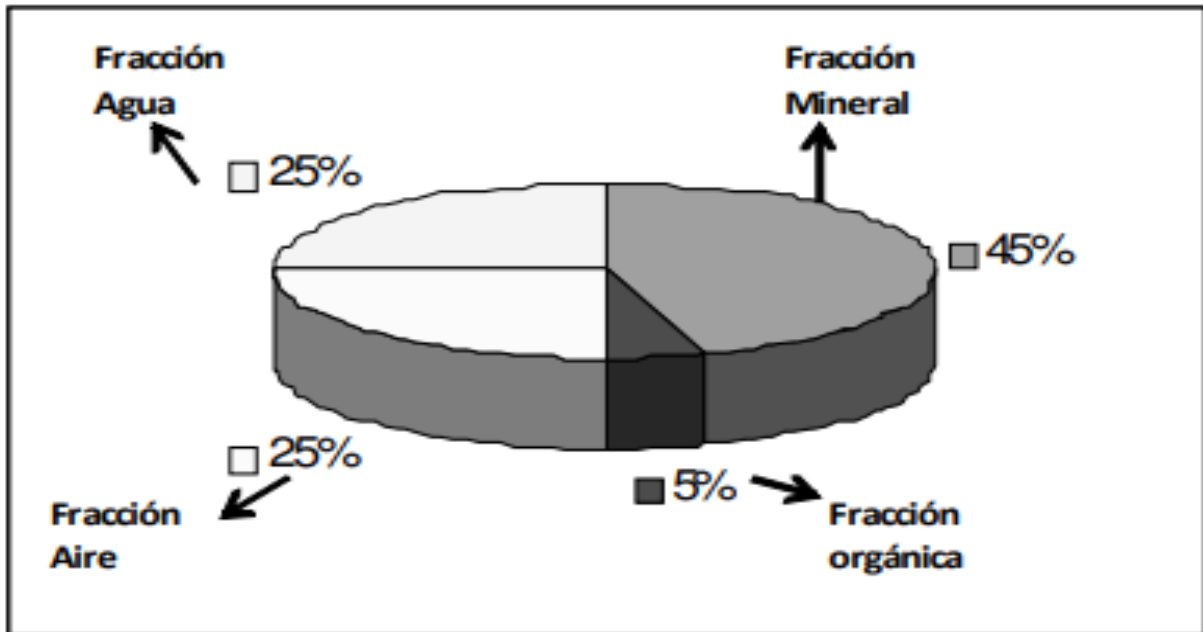
Nota: De *Principles of soil physics*, por R. Lal y M. Shukla, M., 2004, p. 142, CRC Press, Taylor & Francis Group.

Casanova y Lobo (2007) indican que un suelo ideal, desde el punto de vista de su composición volumétrica, debiese estar conformado por 50% de fracción sólida y 50% de fracción porosa. Por una parte, la fracción sólida estaría constituida por 45% de la fracción mineral y 5% de fracción orgánica y la fracción porosa estaría constituida por macroporos (25%) que son los responsables de la aireación y por microporos que son los responsables de la retención de la humedad (25%) (Figura 5). Sin embargo, por prácticas de manejo inadecuadas, los cuatro componentes sufren cambios en sus valores, convirtiéndose en un suelo compactado y en consecuencia con efectos negativos sobre el rendimiento de los cultivos. En el ejemplo de los autores se aprecia los cambios entre un suelo “ideal” versus un suelo compactado (Figura 6). La perturbación del espacio poroso, a consecuencia de una carga que supera la resistencia del

suelo, ocasiona el colapso de los poros y conduce a procesos de degradación edáfica, declinación productiva e impactos hidrológicos importantes (Gonzales-Barrios et al., 2011).

Figura 5

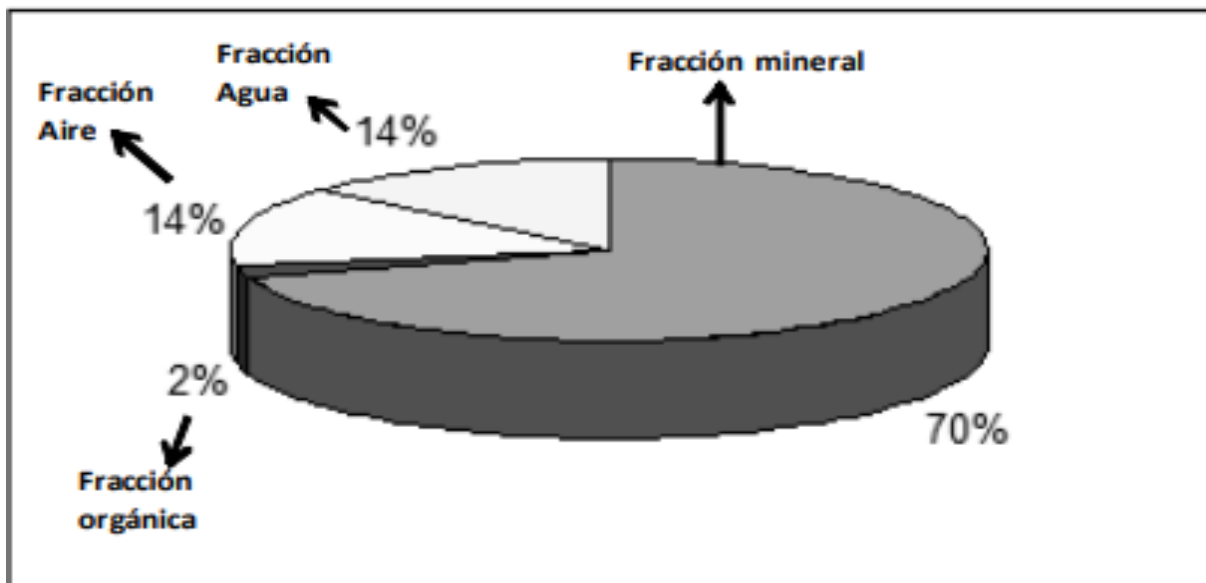
Los componentes en volumen en un suelo “ideal” para el crecimiento de las plantas



Nota: De “Relación entre la física y la fertilidad de los suelos,” de E. Casanova y D. Lobo, 2007, *Venesuelos*, 15, p. 43 (http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/issue/view/141).

Figura 6

Los componentes en volumen de un suelo compactado



Nota: De “Relación entre la física y la fertilidad de los suelos,” de E. Casanova y D. Lobo, 2007, *Venesuelos*, 15, p. 44 (http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/issue/view/141).

Respecto a la clasificación de los poros, Lal y Shukla (2004), la describen también de acuerdo a su tamaño y funciones (Tabla 5 y 6). Con la finalidad de estandarizar la nomenclatura utilizada, los autores sugirieron que los poros de diámetro cilíndrico equivalente (ECD) mayores a 30 μm estén definidos como macroporos, entre 0.2 y 30 μm como mesoporos y < 0.2 μm como microporos. En cuanto a su clasificación respecto a sus funciones en relación al crecimiento de cultivos, los poros con ECD > 50 μm están descritos como poros de transmisión, entre 0.5 y 50 μm como poros de almacenamiento y poros con < 0.5 μm como poros residuales. En relación a las funciones de los poros relacionadas al crecimiento de plantas, poros > 500 μm , especialmente los bioporos son llamados “fisuras” y aquellos < 0.05 μm , son llamados “bonding pores” o poros conectores.

Tabla 5*Algunos sistemas de clasificación de poros en función a su distribución de tamaño*

Referencia	Diámetro cilíndrico equivalente (ECD)		Categoría de poros
	μm		
Manegold (1957)	100 – 5000		Vacíos
	30 – 100		Capilares
	0.002 – 30		Espacios de fuerza
Jongorius (1957)	100 – 5000		Macroporos
	30 – 100		Mesoporos
	0.002 – 30		Microporos
Johnson et al. (1960)	>5000		Grueso
	2000 – 5000		Medio
	1000 – 2000		Fino
	75 – 1000		Muy fino
	<75		Microporos
Brewer (1964)	>5000		Macroporos gruesos
	2000 – 5000		Macroporos medios
	1000 – 2000		Macroporos finos
	75 – 1000		Macroporos muy finos
	30 – 75		Mesoporos
	5 – 30		Microporos
	0.1 – 5		Ultramicroporos
	<0.1		Criptoporos
IUPAC (1972)	0.1 – 5000		Macroporos
	0.005 – 0.1		Mesoporos
	<0.005		Microporos
McIntyre	500 – 5000		Superporos

(1974)	50 – 500	Macroporos
	0.1 – 50	Miniporos
	<0.1	Microporos
Smart (1975)	100 – 5000	Miniporos
	30 – 100	Macroporos
	<30	Microporos
Kay (1997)	>30	Macroporos
	0.2 – 30	Mesoporos
	<0.2	Microporos
Soil Survey Division (1990)	>10 mm	Muy grueso
	5 – 10 mm	Grueso
	2 – 5 mm	Medio
	1 – 2 mm	Fino
	<0.5 mm	Muy fino

Nota: De Principles of soil physics, por R. Lal y M. Shukla, M., 2004, p. 143-144, CRC Press, Taylor & Francis Group.

Tabla 6*Clasificación de los poros en relación a su función*

Nombre	Diámetro cilíndrico equivalente μm	Función
Poros de transmisión	>50	Movimiento de aire y drenaje del exceso de agua
Poros de almacenamiento	0.5 – 50	Retención de agua contra la gravedad y liberación
Poros residuales	0.5 – 0.005	Retención y difusión de iones en soluciones
Poros conectores	<0.005	Soportar fuerzas importantes entre las partículas del suelo

Nota: De *Principles of soil physics*, por R. Lal y M. Shukla, M., 2004, p. 144, CRC Press, Taylor & Francis Group.

Existe una relación entre la porosidad y la textura del suelo, por lo que Ferreyra et al. (2011) refieren que los suelos arenosos tienen una porosidad total menor que los suelos de texturas más finas (francos arcillosos a arcillosos) y se caracterizan por tener un predominio de macroporos y menor retención de humedad. En contraste, los suelos de textura más fina presentan una mayor porosidad total con predominio de microporos y alta capacidad de retención de humedad, lo cual también es señalado por Schaffer et al. (1989). Por lo tanto, la macroporosidad en los suelos de textura más fina será menor comparado con los suelos de texturas más gruesas, lo que podría originar problemas de oxigenación, especialmente cuando se tiene suelos con problemas de compactación. Mayor detalle entre la relación porosidad y textura se aprecia en la Tabla 7.

Tabla 7

Relación entre el tamaño de poros y la textura, de acuerdo a Schaffer et al. (1989)

Textura	Volumen de poros %	Macroporos %	Poros de tamaño medio %	Microporos %
Arenosa	46 (± 10)	30 (± 10)	7 (± 5)	5 (± 3)
Limosa	47 (± 9)	15 (± 10)	15 (± 7)	15 (± 5)
Arcillosa	50 (± 15)	8 (± 5)	10 (± 5)	35 (± 10)
Orgánica	85 (± 10)	25 (± 10)	40 (± 10)	25 (± 10)

Nota: De Propiedades físicas del suelo, por O. Loli, 2022, Curso de capacitación de la empresa Molinos & CIA.

3.5.4 Resistencia mecánica a la penetración

La resistencia de penetración es la capacidad del suelo en su estado de confinamiento (in situ) de resistir a la penetración de un objeto rígido (Soil Science Division Staff, 2017).

Sellés et al. (2012) comentaron que la resistencia mecánica a la penetración del suelo (RP) está influenciada por la textura, estructura y contenido de humedad presente en el suelo. Por ejemplo, en suelos más secos, mayor será su resistencia a la penetración. Los valores de resistencia mecánica del suelo que empiezan a limitar el desarrollo de las raíces en paltos se encuentran a partir de 1.0 MPa y sobre los 2.0 MPa, la limitación es fuerte (R. Ferreyra, comunicación personal, 07 de setiembre de 2022). Hitoshi et al. (2000) señalan que para la mayor parte de cultivos, los valores de resistencia a la penetración, por encima de 2.0 MPa limitan el crecimiento y funcionamiento del sistema radicular, sostenido también por Tormena et al. (1998), aunque hay especies adaptadas a valores por encima de este valor y hay especies cuyo umbral está por debajo de 2.0 MPa y que valores por encima de 2.0 MPa causarían limitaciones en el desarrollo de raíces y de la parte aérea en el cultivo del maíz. Adicionalmente valores sobre los 3.5 MPa causarían severas limitaciones para el crecimiento del trigo (Tormena et al., 2002).

Un suelo es considerado compactado cuando la porosidad total, especialmente los poros que contienen aire, son tan bajos que restringen la aireación y/o cuando el suelo está tan “apretado”

y sus poros son tan pequeños que impiden la penetración de las raíces, la infiltración el agua y el drenaje (Hillel, 2003).

Sellés et al. (2012) precisan que la medición de la resistencia mecánica a la penetración del suelo se realice cuando el suelo esté a capacidad de campo, con la finalidad de excluir los efectos del contenido de humedad, de tal manera que el valor medido corresponda solo a los efectos de la compactación del suelo. El crecimiento radical requiere de una adecuada relación suelo-aire en el suelo, además de una baja resistencia mecánica y este equilibrio es mucho más complejo en suelos de texturas finas, mal estructurados y/o compactados.

En la Tabla 8 se presenta los niveles de resistencia mecánica a la penetración.

Tabla 8

Clasificación del suelo respecto a su resistencia mecánica a la penetración

Categoría	Resistencia MPa
Extremadamente baja	< 0.01
Muy baja	0.01 – 0.1
Baja	0.1 a < 1.0
Moderada	1.0 a < 2.0
Alta	2.0 a < 4.0
Muy alta	4.0 a < 8.0
Extremadamente alta	> 8.0

Nota: De *Soil survey manual: Handbook 18*, por Soil Science Division Staff, 2017, p. 191, Government Printing Office. USDA.

Namesny et al. (2020) sugieren realizar una adecuada preparación de suelo pre-plantación, con el objetivo de tener un suelo con resistencia mecánica a la penetración inferior a 1.0 MPa y por lo menos a una profundidad de 100 cm. Este trabajo se está realizando con excavadoras o bulldozers y en algunas condiciones se está evaluando la posibilidad de realizar movimientos de suelo en la etapa de post-plantación mediante miniexcavadoras.

3.5.5 Profundidad del suelo

La profundidad de restricción del desarrollo radicular, en la cual las características físicas del suelo (incluido la temperatura) y/o las características químicas inhiben fuertemente la penetración de las raíces, varía de acuerdo a cada cultivo (Soil Science Division Staff, 2017). De acuerdo a Loli (2013), la profundidad de un suelo agrícola es muy importante en el manejo del suelo e influye mucho en el desarrollo de los cultivos, principalmente en la capacidad de suministro de agua y nutrientes, movimiento interno de agua y en la penetración de sus raíces. En Tabla 9 se muestra la categorización de los suelos en base a la profundidad de las raíces.

Tabla 9

Clasificación de los suelos en base a la profundidad de las raíces

Categorización	Profundidad de raíces cm
Muy superficial	< 25
Superficial	25 a < 50
Moderadamente profundo	50 a < 100
Profundo	100 a < 150
Muy profundo	> 150

Nota: De *Soil survey manual: Handbook 18*, por Soil Science Division Staff, 2017, p. 119, Government Printing Office. USDA.

En comparación con otros frutales, los paltos desarrollan sistemas radiculares relativamente superficiales. La profundidad máxima de enraizamiento del palto en suelos con buen drenaje es de 1.2 a 1.5 m y con la mayor parte de su sistema radicular (70 - 80%) desarrollado en los primeros 60 cm de profundidad (Schaffer et al., 2013).

3.5.6 Conductividad hidráulica

Loli (2013) define a la conductividad hidráulica como la velocidad de movimiento del agua dentro del perfil del suelo y está influenciada por las propiedades del suelo, principalmente por

la geometría de sus partículas, las cuales determinan la máxima conductividad hidráulica y su gradiente. Según Gabriels et al. (2006), la conductividad hidráulica es la propiedad del suelo que describe la facilidad con la cual los poros del suelo permiten el flujo de agua. Cabe señalar que cuando el suelo se satura, todos los poros podrán dirigir el agua y la conductividad estará en su máxima expresión (representada como K_s), mientras que en condiciones insaturadas o no saturadas es representada como $K(q)$. De acuerdo a Soil Science Division Staff (2017), Existe una distinción entre la conductividad hidráulica saturada y no saturada. La conductividad hidráulica saturada ocurre cuando la presión del agua del suelo es positiva y el potencial mátrico del suelo es cero, el cual en la mayoría de suelos esta situación ocurre cuando cerca del 95% del total del espacio poroso está lleno con agua (y el 5% restante contiene aire atrapado) y en caso el suelo permanezca saturado por varios meses o más, la totalidad de sus poros estarían cercanos al 100% llenos de agua. Por otro lado, la conductividad hidráulica no saturada es cuando los poros grandes están llenos con aire. Cabe precisar que la conductividad hidráulica saturada no puede ser utilizada para describir el movimiento del agua bajo condiciones de no saturación y Gabriels et al. (2006), agregan que en cualquiera de los dos casos, esta conductividad dependerá del tamaño, número, distribución, orientación y continuidad de los poros (especialmente los de retención), el tamaño de las partículas, tipo de fluido, cantidad relativa de fluido presente en la matriz del suelo y es por ello que existe una relación cuantitativa entre la conductividad hidráulica y el volumen de agua en un suelo que cuenta con un alto porcentaje de partículas grandes (arenas), las cuales facilitarán el paso del agua rápidamente, mientras que en aquellos suelos con un alto porcentaje de partículas pequeñas (arcillas), el paso del agua será más lento.

Cuando se tiene una alta conductividad hidráulica, el paso del agua hacia abajo es tan rápido que la superficie del suelo permanecerá mojada solo pocas horas, lo cual ocurre en suelos gravosos y/o arenosos (granulometría mediana a gruesa). En situaciones de una moderada conductividad hidráulica, las capas transmiten el agua lo suficientemente rápido, de manera que el suelo permanece mojado por no más de pocos días y finalmente bajo situaciones de baja conductividad hidráulica, el suelo transmitirá el agua tan lentamente que permanecerá mojado por una semana o más tiempo, ocasionando limitaciones de oxigenación, tal como lo indicó Loli (2013).

La conductividad hidráulica saturada es una medida cuantitativa de la habilidad de un suelo saturado de transmitir agua que es sometida a un gradiente hidráulico. Dicho de otra forma, es la facilidad con la que los poros de un suelo saturado permiten el movimiento del agua, y a su vez

es controlada por dos factores: i. la resistencia de la matriz del suelo al flujo de agua y ii. las fuerzas que actúan sobre cada unidad del agua presente en el suelo (Soil Science Division Staff, 2017).

Las clases de conductividad hidráulica saturada del suelo se pueden observar en la Tabla 10.

Tabla 10

Clases de conductividad hidráulica saturada del suelo

Clases	Ksat $\mu\text{m s}^{-1}$
Muy alta	≥ 100
Alta	10 a < 100
Moderadamente alta	1.0 a < 10
Moderadamente baja	0.1 a < 1.0
Baja	0.01 a < 0.1
Muy baja	< 0.01

Nota: Ksat: constante de conductividad hidráulica saturada que relaciona el ratio del flujo de agua del suelo con la gradiente hidráulica, $\mu\text{m s}^{-1}$: equivale a 36 cm h^{-1} . De *Soil survey manual: Handbook 18*, por Soil Science Division Staff, 2017, p. 221, Government Printing Office. USDA.

3.5.7 Drenaje

De acuerdo con Loli (2012), el drenaje está determinado por la misma capacidad intrínseca del suelo para mantener una adecuada retención de humedad y disponer de una adecuada aireación, por la topografía y la susceptibilidad del área de sufrir inundaciones y por las condiciones climáticas del lugar. Existen problemas de drenaje interno por disposición de texturas en el perfil del suelo, como cuando se tiene texturas arcillosas en el subsuelo y éstas no permiten el rápido movimiento del agua, originando condiciones de saturación permanentes o estacionales y dando lugar a procesos de óxido-reducción en el suelo que se pueden evidenciar por la aparición de moteaduras en la zona afectada. Pla (2014) menciona que un drenaje restringido

puede deberse, tanto a la baja permeabilidad del suelo, como a la presencia de niveles freáticos poco profundos.

Palma (2021), mencionó que la distribución del tamaño de los poros presente en el suelo tiene mucha relación con la retención de agua y el drenaje esperado del suelo. Dependiendo del diámetro de los poros, se puede clasificar desde poros de drenaje rápido (diámetro equivalente $> 50 \mu\text{m}$), poros de drenaje lento (diámetro equivalente entre 10 y $50 \mu\text{m}$), poros de agua útil (diámetro equivalente entre 0.2 y $10 \mu\text{m}$) y poros de agua no útil (diámetro equivalente $< 0.2 \mu\text{m}$), tal como lo indica la Tabla 11.

Tabla 11

Relación del tamaño de poros con la retención de agua y drenaje

Tipos de poros	Diámetro equivalente μm	Tensión de agua hPa	Base de orientación
Poros de drenaje rápido	> 50	$6 \cdot 10^1$	
Poros de drenaje lento	50–10	$6 \cdot 10^1 - 3 \cdot 10^2$	Capacidad de campo (Valor más frecuente)
Poros de agua útil	10-0.2	$3 \cdot 10^2 - 1.5 \cdot 10^4$	Capacidad de campo (Valor máximo)
Poros de agua inútil	< 0.2	$1.5 \cdot 10^4$	Punto de marchitez permanente

Nota: hPa: hectopascal que equivale a 100 Pa y 0.1 kPa. De *Nutrición en Palto*, por J. Palma, 2021, Curso Intensivo de la empresa SQM VITAS.

3.6 Decaimiento de huertos de paltos: causas y síntomas

3.6.1 Principales causas de decaimiento de huertos de paltos

Havlin et al. (2017) precisaron que para alcanzar el máximo potencial productivo de un cultivo en particular, depende de las características medioambientales del año y de la habilidad del productor para identificar, eliminar o minimizar aquellos factores que reducen el potencial de

rendimiento. La ley del mínimo originalmente se basaba en los límites de nutrientes, pero el principio se puede aplicar a otros factores que influyen en el rendimiento de los cultivos. Por ejemplo, agua disponible y el productor deberá de minimizar este factor como el limitante. En todo el mundo, los principales factores de estrés que reducen el potencial de rendimiento de los cultivos, están relacionados con el agua disponible para las plantas, temperatura y disponibilidad de nutrientes. Lemus et al. (2010) mencionan que los principales factores de estrés que restringen el desarrollo del palto y comprometen su productividad corresponden a: déficit de oxígeno en el suelo, compactación del suelo, falta de nutrientes, “emboscamiento” del huerto, salinidad, estrés climático (térmico, presencia de heladas e intensidad de radiación), entre otros; siendo sin duda el mal manejo de riego asociado a suelos limitantes el factor que más condiciona la productividad de este cultivo. Asimismo, Havlin et al. (2017) indican que son muchos los factores que afectan el crecimiento de los cultivos y su potencial de rendimiento y aunque el productor no puede controlar muchos de los factores climáticos, sí puede controlar la mayoría de los factores del suelo y propios del cultivo, los cuales deben ser correctamente gestionados para maximizar la productividad, teniendo en consideración que la mayoría de estos factores que influyen sobre el potencial productivo, van a interactuar entre sí para aumentar o disminuir el crecimiento del cultivo y su rendimiento. Entonces, el reto del productor está en identificar todos los factores limitantes del rendimiento y eliminar o minimizar la influencia de los que sí se pueden gestionar. Por ejemplo: i. Referido a factores climáticos se tiene a: precipitación (cantidad y distribución), temperatura del aire, humedad relativa, luminosidad, (cantidad, intensidad y duración), altitud, latitud, viento (velocidad y distribución), concentración de CO₂, entre otros; ii. Referido a factores de suelo se tiene a: materia orgánica, textura, estructura, capacidad de intercambio catiónica, pH, pendiente y topografía, factores de manejo de suelo (labranza, drenaje, etc), profundidad de raíces, contenido nutricional, elementos tóxicos, entre otros; iii. Referido a los factores propios del cultivo se tiene a: variedad y especies a cultivar, fecha de plantación, calidad de semilla, evapotranspiración, disponibilidad de agua, nutrición, plagas y enfermedades, malezas, rotación de cultivos, entre otros.

Respecto al efecto de las propiedades físicas del suelo sobre la producción de los cultivos, Letey (1985) precisa que se debe de diferenciar aquellos factores que la afectan el desarrollo de las plantas de manera directa, de aquellos que la afectan de manera indirecta. Dentro del grupo que la afecta de manera directa, se tiene a: i. Contenido de agua en el suelo y su potencial hídrico (es la energía con la que el agua es retenida por el suelo, definida también como la energía necesaria para que las raíces remuevan el agua retenida por el suelo), ii. Concentración de

oxígeno en los poros y tasa de difusión de oxígeno (O.D.R.), iii. Temperatura del suelo (los procesos metabólicos de la raíz son muy dependientes de la temperatura del suelo) y iv. Resistencia mecánica a la penetración y dentro del grupo que afecta el desarrollo de las plantas de manera indirecta se tiene a: i. Densidad aparente, ii. Textura, iii. Presencia de agregados, iv. Estabilidad de agregados y v. Distribución del tamaño de poros; y estos factores indirectos se alteran fácilmente con la erosión y además se relacionan con la producción de los cultivos, a través de su influencia con el agua del suelo, aireación, temperatura y resistencia mecánica a la penetración (por eso su efecto sobre la producción es indirecto).

Kozlowski (1985) indica que las raíces requieren de un suministro de oxígeno, agua y nutrientes minerales del suelo, siendo el oxígeno necesario para mantener la respiración aeróbica de las raíces y le permita formar la energía requerida para el consumo de nutrientes, síntesis de protoplasma y mantenimiento de las membranas celulares; mientras que en suelos con pobre aireación, la respiración anaeróbica de las raíces no libera suficiente energía para mantener el funcionamiento de las raíces, especialmente el consumo de nutrientes; además de acumularse sustancias tóxicas en el suelo, tales como metano, sulfuros, óxido ferroso y otros compuestos reducidos. Asimismo, Schaffer (2006) indica que la primera respuesta en el palto cuando se tiene un bajo contenido de oxígeno en el suelo, es la alteración en el metabolismo de su raíz, acompañado de una reducción en la producción de energía por la planta (ATP) durante el proceso de respiración de la raíz y esto se debe a que en condiciones normales, durante el proceso de glicólisis (oxidación de glucosa a ácido pirúvico), se tiene una producción neta de 2 ATP y posteriormente si los niveles de oxígeno son los adecuados, se continuará con la respiración aeróbica en los cuales durante el ciclo de Krebs y cadena transportadora de electrones, se produce sobre los 36 ATP; mientras que si hubiese una falta de oxígeno, se tendrá una respiración anaeróbica (fermentación), en la cual no se tiene producción de ATP y quedaría finalmente solo los 2 ATP formados durante la glicólisis; y todo esto conlleva a una pérdida de la funcionalidad de la raíz con todas sus consecuencias.

Según Ferreyra et al. (2011), una de las principales causas de los bajos rendimientos de paltos en el mundo es también la asfixia radicular, debido a que muchos de los huertos están plantados en condiciones desfavorables de suelo, los cuales presentan una baja capacidad de aire, situación que es agravada por malas prácticas de riego. Esta falta de oxígeno en el suelo induce a múltiples disfunciones en las plantas, tales como: i. inhibe la fotosíntesis y el transporte de carbohidratos, ii. disminuye la absorción de macronutrientes (debido a la afectación de las raíces y microbiología benéfica de la rizósfera), iii. altera el balance hormonal (debido al incremento

de etileno en la atmósfera del suelo), iv. afecta el metabolismo del sistema radical e v. induce el cierre estomático. Estos efectos también fueron mencionados por Kozlowski (1985), quien resalta que las respuestas fisiológicas a la inundación (pobre aireación del suelo) incluyen cierre de estomas, reducción de la fotosíntesis y consumo de nutrientes esenciales; además de alteraciones hormonales. Todo esto se traduce finalmente en una reducción del crecimiento de raíces y brotes, menor expansión de hojas, menor crecimiento reproductivo de los árboles e induce a una senescencia y abscisión prematura de hojas y órganos reproductivos (flores y frutos). Schaffer et al. (2013) señala que la rápida reducción de la conductancia estomática es una respuesta fisiológica del palto a la asfixia radicular.

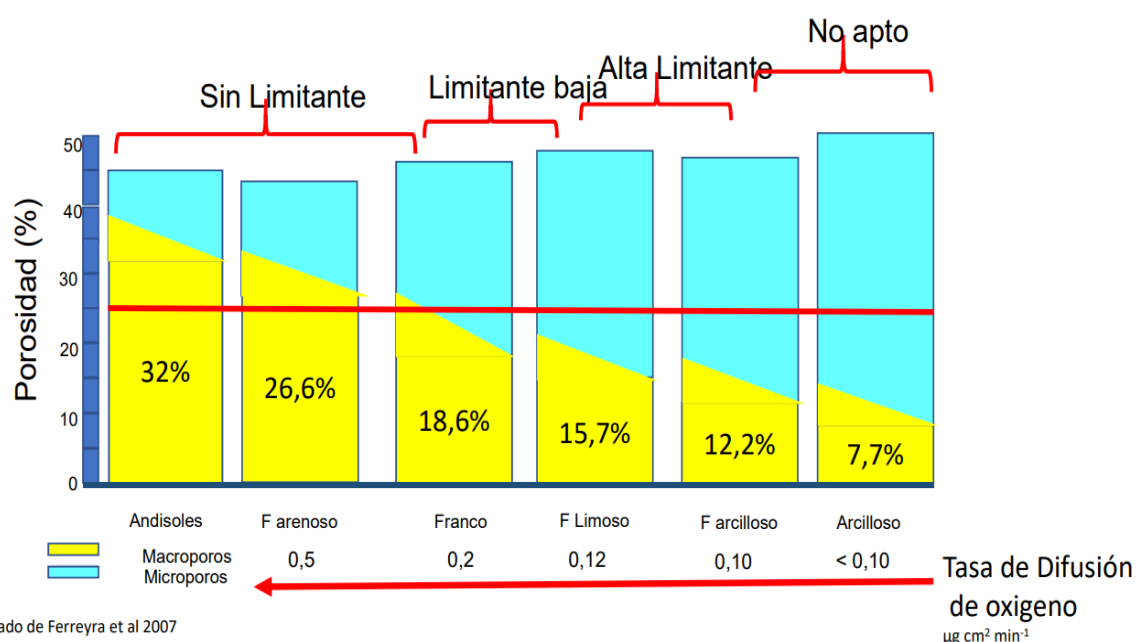
Ferreira et al. (2011) sostienen que las raíces pueden tomar el oxígeno desde el suelo; sin embargo, esta cantidad sólo representa una pequeña fracción del total de su requerimiento. Por ello, la mayor parte del oxígeno requerido por la raíz debe provenir de la atmósfera a través del suelo y del espacio poroso, para luego entrar a la raíz donde es utilizado. El nivel de oxígeno del suelo está relacionado con su velocidad de difusión. La velocidad de difusión del oxígeno a través del agua es diez mil veces más lenta que en el aire y por tal motivo, uno de los grandes problemas que afectan la difusión del oxígeno en la zona de raíces es un exceso de humedad y/o un mal drenaje. La tasa de difusión de oxígeno (O.D.R.) es una medida de la movilidad de oxígeno en el suelo y está directamente relacionada con el contenido de aire presente en el suelo. Gil et al. (2012) mencionaron que en suelos con contenidos de aire cercanos al 17% se registraron O.D.R. de $0.17 \mu\text{g cm}^{-2} \text{min}^{-1}$, el cual es un valor inferior al límite de difusión de oxígeno establecido como adecuado para el desarrollo del palto. Las plantas de palto de variedad 'Méxícola', que crecen en suelos con una tasa la difusión de oxígeno menor a $0.17 \mu\text{g cm}^{-2} \text{min}^{-1}$, tienen entre 44 a 100% de sus sistemas radiculares dañados. Varios estudios han demostrado que las raíces de ciertas variedades de palto, como 'Scott', 'Duque' y 'Topa Topa', no crecen bien cuando la tasa de difusión de oxígeno es menor a $0.20 \mu\text{g cm}^{-2} \text{min}^{-1}$, aproximadamente. Posteriormente, se publicó que en el palto 'Hass' sobre portainjerto 'Méxícola' disminuye su conductancia estomática cuando la O.D.R. está cercana a los $0.17 \mu\text{g cm}^{-2} \text{min}^{-1}$. Esto coincide con lo mencionado por Letey, J. (1985), quien sostiene que valores de O.D.R. por debajo de $0.20 \mu\text{g cm}^{-2} \text{min}^{-1}$, limitan el crecimiento de las raíces de muchos cultivos y valores por encima de $0.20 \mu\text{g cm}^{-2} \text{min}^{-1}$, son los adecuados para favorecer el crecimiento de las raíces; teniendo siempre en consideración que el valor de esta tasa va a variar de acuerdo al tiempo de haber recibido el riego y de acuerdo también a la profundidad del perfil de suelo que se esté evaluando. Armstrong et al. (1990) indicaron que el oxígeno es esencial

para la supervivencia a largo plazo de las puntas radiculares (no latentes) y las raíces mal aireadas tendrán menor tolerancia a la acumulación de fitotoxinas (por ejemplo: Mn^{2+} , Fe^{2+} , sulfuros, etc) y esta anoxia puede matar directamente a las puntas de las raíces o hacerlo a través de una lesión post-anóxica que involucra a las especies reactivas de oxígeno (ROS).

Ferreira et al. (2011) indica que el sistema radicular del palto es superficial, extensamente suberizado y relativamente ineficiente en la absorción de agua por su baja conductividad hidráulica y a la no presencia de pelos radicales. Paltos plantados en terrenos arenosos, con un contenido de aire en el suelo (E_a) de 29%, presentan una conductancia estomática (g_s) de 0.43 cm s^{-1} ; por el contrario, en suelo franco con 7.38% de E_a , su g_s disminuirá a 0.19 cm s^{-1} . En la Figura 7 se aprecia las limitaciones en el contenido de aire a nivel del suelo según la clase textural y en la Figura 8 se observa las diferencias en el desarrollo del palto a diferentes contenidos de aire en el suelo.

Figura 7

Limitaciones en el contenido de aire a nivel del suelo según la clase textural



Nota: De Características del suelo relacionadas con el riego, por R. Ferreira, 2021, p. 87. Curso internacional de paltos organizado por Red Agrícola.

Figura 8

Diferencias en el desarrollo del palto a diferentes contenidos de aire en el suelo



Foto 1.
(Izquierda)
Palto creciendo
con 29% de aire
en el suelo.

Foto 2.
(Derecha)
Paltos creciendo
con 7% de aire
en el suelo.

Nota: Foto 1 corresponde a un suelo de textura franco arenoso y la Foto 2 a un suelo franco limoso. De *Manejo del riego y suelo en palto*, por R. Ferreyra y G. Sellés, 2007, p. 15, Boletín INIA N° 160. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

3.6.2 Síntomas de decaimiento de huertos de palto

Ferreyra et al. (2011) comentaron que los síntomas de decaimiento del palto y su severidad están relacionados a su grado de afectación. Los bajos contenidos de aire en el suelo, primero deterioran el sistema radicular y posteriormente afectan a la parte aérea. A continuación, se señala los síntomas de decaimiento del palto.

- Escasas raíces en el camellón y bajo la hojarasca.
- Hojas angostas e inclinadas hacia el suelo.
- Color de follaje verde amarillento.
- Alto aborto floral.
- Caída abundante de frutos a fines de primavera y/o finales de verano.
- Defoliación de brotes de la temporada y golpe de sol en la fruta.
- Árbol defoliado con exceso de floración.

- Fruta de bajo calibre.
- Árboles con puntas quemadas (incluso en condiciones de baja salinidad).
- Bajos rendimientos productivos y aumento de desórdenes fisiológicos (por ejemplo “pardeamiento vascular”).
- Mayor incidencia de *Lasiodiplodia theobromae* y *Phytophthora cinnamomi*.

Schaffer (2006) coincide con los síntomas señalados líneas arriba e indica que los daños en las estructuras vegetativas, a consecuencia del bajo contenido de aire en el suelo, corresponden a un efecto indirecto del mismo, debido a la menor eficiencia del metabolismo radicular, pérdidas de las funciones de la raíz (por ejemplo: menor consumo de agua y minerales), reducción de la biomasa radicular, entre otros.

3.6.3 Otras causas de decaimiento de huertos

3.6.3.1 Salinidad

La salinidad del suelo, representada por la conductividad eléctrica (CE), es una propiedad química del suelo que afecta el manejo de los nutrientes y el rendimiento de los huertos. La conductividad eléctrica es una medida indirecta de la cantidad de sales que contiene un suelo. La unidad utilizada es milimhos por cada centímetro (mmhos cm^{-1}) o en su equivalente de dS m^{-1} . Los suelos con elevadas conductividades eléctricas impiden el buen desarrollo de las plantas ya que contienen una elevada cantidad de sales. Un alto contenido de sales disueltas en el suelo disminuye el potencial osmótico y exige a las raíces un esfuerzo adicional para poder absorber el agua. Este menor consumo de agua por parte de la planta puede dar como resultado un crecimiento reducido o lento y mermas en el rendimiento del huerto. A su vez, también podría originarse fitotoxicidad, que es específica a ciertos elementos, siendo las más comunes la de sodio y cloruro, lo que finalmente se traducen no solo en síntomas visuales sino también en mermas de rendimiento (Ferreyra y Sellés, 2013).

Una vez que la cantidad acumulada de sales en el suelo sobrepasa un umbral, que depende del cultivo, la producción desciende linealmente. Respecto a los umbrales de tolerancia a la salinidad del palto, Ayers y Westcot (1976) reportan el valor de 1.3 dS m^{-1} (referido al valor de conductividad eléctrica del extracto saturado de suelo). Mientras, la mayoría de autores señalan valores entre 1.0 a 1.8 dS m^{-1} (referido también a la metodología de extracto saturado del suelo);

además, está reportado que un valor de conductividad eléctrica de 2.0 dS m⁻¹, provocaría una pérdida en el rendimiento del 10%.

Pla (2014) precisa que los suelos salinos se caracterizan por la acumulación de electrolitos en la solución del suelo y al subir la presión osmótica de dicha solución, limitan fuertemente la probabilidad de absorción de agua y nutrientes por las plantas, también menciona que, en general, los problemas de salinidad son resultado de la acumulación de sales en zonas y profundidades donde el régimen de humedad del suelo se caracteriza por fuertes pérdidas de agua por evaporación y transpiración y por un reducido lavado de sales que quedan.

A continuación, en la Tabla 12 se muestra la clasificación del suelo respecto a su salinidad (referido a la metodología de extracto saturado) y en la Tabla 13 se presenta los valores del umbral de salinidad en algunos frutales adultos.

Tabla 12

Clasificación de los suelos de acuerdo a su salinidad

Clasificación del suelo	CEes dS m⁻¹
Muy ligeramente salino	< 2.0
Ligeramente salino	2 – 4
Moderadamente salino	4 – 8
Fuertemente salino	> 8.0

Nota: CEes: conductividad eléctrica en extracto de saturación. De Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF).

Tabla 13

Valores del umbral de salinidad en algunos frutales adultos según Ayers y Westcot (1976)

Cultivo	CE mmhos cm⁻¹	g L⁻¹
Almendro	2.4	1.55
Ciruelo	2.5	1.60
Damasco	2.3	1.45
Duraznero	2.6	1.70
Granado	4.7	3.00
Higuera	4.7	3.00
Manzano	3.0	1.95
Naranja	3.0	1.95
Nogal	3.0	1.95
Olivo	4.7	3.00
Palto	1.3	0.83
Peral	3.0	1.95
Vid	3.3	2.10

Nota: CE: conductividad eléctrica del extracto saturado de suelo. De *Manual de riego para frutales: Uso eficiente del agua de riego y estrategias para enfrentar períodos de escasez*, por R. Ferreyra y G. Sellés, 2013, p. 119, Boletín INIA N° 278. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

3.6.3.2 Carbonato total y caliza activa

Según Ferreyra et al. (2008), normalmente los huertos de paltos presentan síntomas de clorosis férrica en suelos de pH alcalino que tienen sobre 5.0% CaCO₃ y/o presentan más de 2.0 mmol L⁻¹ de bicarbonatos.

La caliza activa se define como la fracción de carbonatos de tamaño inferior a 50 µm y debido a su gran superficie relativa es fácilmente soluble en agua, enriqueciendo la solución del suelo con iones bicarbonato, lo que parece estar asociado a problemas de clorosis férrica (AGQ Labs, 2019). Namesny et al. (2020) consideran que su nivel crítico es sobre el 6%.

3.6.3.3 Materia orgánica

AGQ Labs (2019) refiere que la determinación de la materia orgánica en el suelo es importante porque cuando en el suelo se encuentra en niveles bajos se espera algunos problemas en las propiedades físicas del suelo, como en su estructura, dureza y limitado flujo de agua. Por lo tanto, podría afectarse la aireación del suelo y la facilidad para que el suelo sea explorado por el sistema radical. La Tabla 14 presenta los niveles de materia orgánica en el suelo.

Tabla 14

Clasificación del suelo respecto a su porcentaje de materia orgánica

Clasificación	MO %
Bajo	< 2.0
Medio	2 – 4
Alto	> 4.0

Nota: MO: materia orgánica. De Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF).

Lal (2020b, 2022) exhorta a los agricultores a no olvidar que el suelo es un ser vivo (el 25% de la biodiversidad está en el suelo) y “como cualquier ser vivo, también debería tener derecho a que se le proteja, restaure y gestione debidamente”. La salud del suelo depende de la salud de los organismos que lo conforman. En un suelo saludable, esos organismos representan cerca de 5 t de biomasa viviente y si no se devuelve ninguna materia orgánica, ningún residuo de la cosecha, estos organismos no tendrán “alimento” y mueren, afectando finalmente la calidad del suelo. Además, Lal (2020c) sostiene que la principal causa de la degradación del suelo en las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe es la desertificación. Otras causas importantes de degradación son la pérdida de biodiversidad, deforestación, compactación (por el uso de maquinaria y otros), etc., las cuales dejan a los suelos en una situación vulnerable frente a la erosión hídrica y degradación química (salinidad o acidez), siendo más crítica en aquellos suelos con poco contenido orgánico.

3.6.3.4 Temperatura y radiación atmosférica

En el subcapítulo 3.4 (Ecología del palto) se describió como la temperatura y la radiación atmosférica afectan negativamente al metabolismo del palto, sobre todo cuando presentan valores por encima o por debajo de sus umbrales.

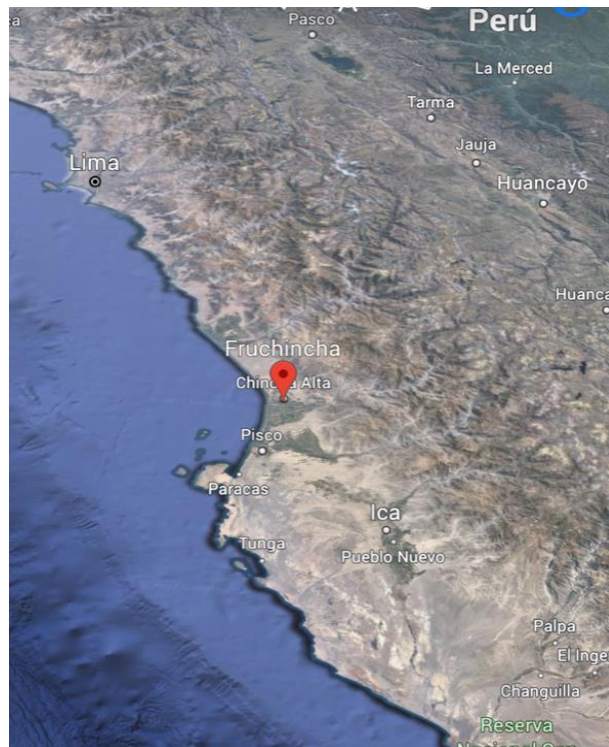
IV. DESARROLLO DEL TRABAJO

4.1 Ubicación de los campos de cultivo

La experiencia profesional se desarrolló en los campos de palto que forman parte de la Corporación Frutícola de Chincha S.A.C., la cual cuenta con un área de 743 hectáreas de paltos en producción y 55 hectáreas en crecimiento, distribuidos en 8 fincas. Los campos están ubicados en la provincia de Chincha, departamento de Ica, desde los 30 a 180 msnm (Figura 9) y el packing está ubicado en las coordenadas $13^{\circ}30'49.22''S$ y $76^{\circ}07'07.11''O$.

Figura 9

Ubicación de Corporación Frutícola de Chincha S.A.C.



Nota: De Google Earth, 2022.

4.2 Antecedentes encontrados al inicio de la experiencia profesional

4.2.1 Antecedentes de la productividad del palto

En el valle de Chincha históricamente se ha tenido rendimientos entre el rango de 5.0 - 18 t ha⁻¹, siendo el promedio histórico de 8.0 – 10 t ha⁻¹.

4.2.2 Antecedentes de las condiciones climáticas

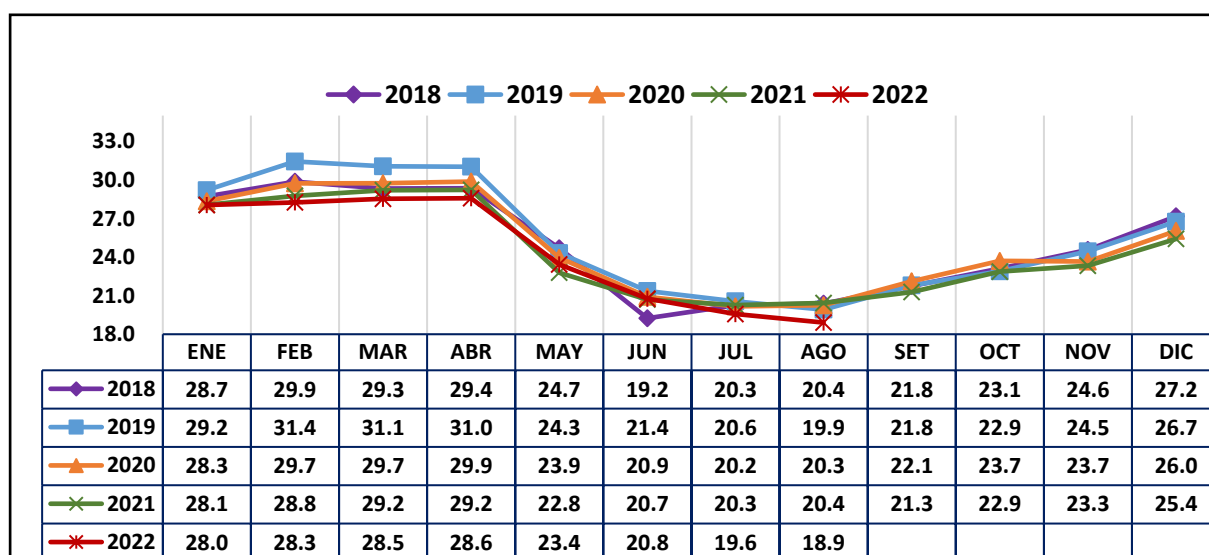
Con ayuda de la estación meteorológica de la Corporación Frutícola de Chincha S.A.C., marca Davys, se ha monitoreado y almacenado información climatológica durante el periodo 2018 – 2022, por lo que se comparte las temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa y evapotranspiración de referencia de la zona en estudio.

4.2.2.1 Temperatura máxima

Entre los meses de enero a abril, meses en los que se presenta mayor incidencia de los rayos solares, ocurren las temperaturas más altas, que en promedio están en un rango de 28 - 32°C. Por otro lado, el descenso de la temperatura se empieza a notar desde el mes de mayo hasta agosto, donde el cielo se presenta con mayor cobertura nubosa y las temperaturas máximas disminuyen a promedios de 18 a 21°C (Figura 10).

Figura 10

Temperatura máxima (°C) mensual durante el periodo 2018 al 2022

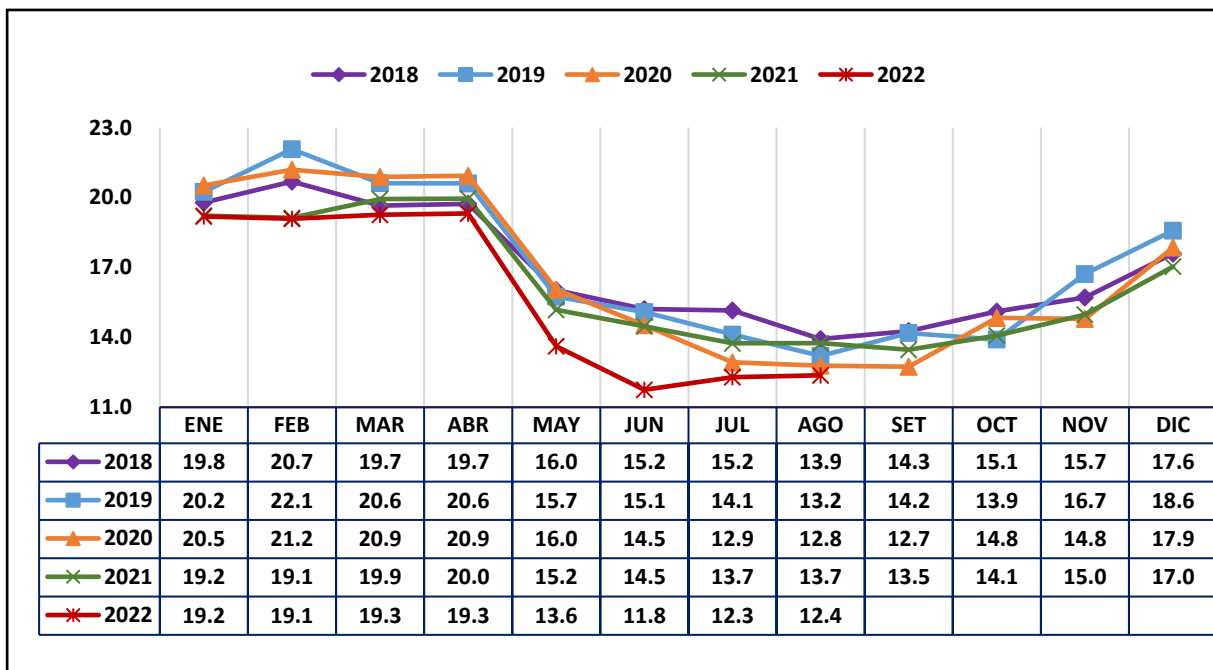


4.2.2.2 Temperatura mínima

Los máximos valores de la temperatura mínima ocurren durante el verano hasta inicios de otoño (entre los meses de enero hasta abril), con temperaturas desde los 19°C hasta los 22°C. Por otro lado, el descenso de temperatura que se registran desde los meses de mayo hasta setiembre, alcanza valores mínimos de 12 a 14°C (Figura 11).

Figura 11

Temperatura mínima (°C) mensual durante el periodo 2018 al 2022

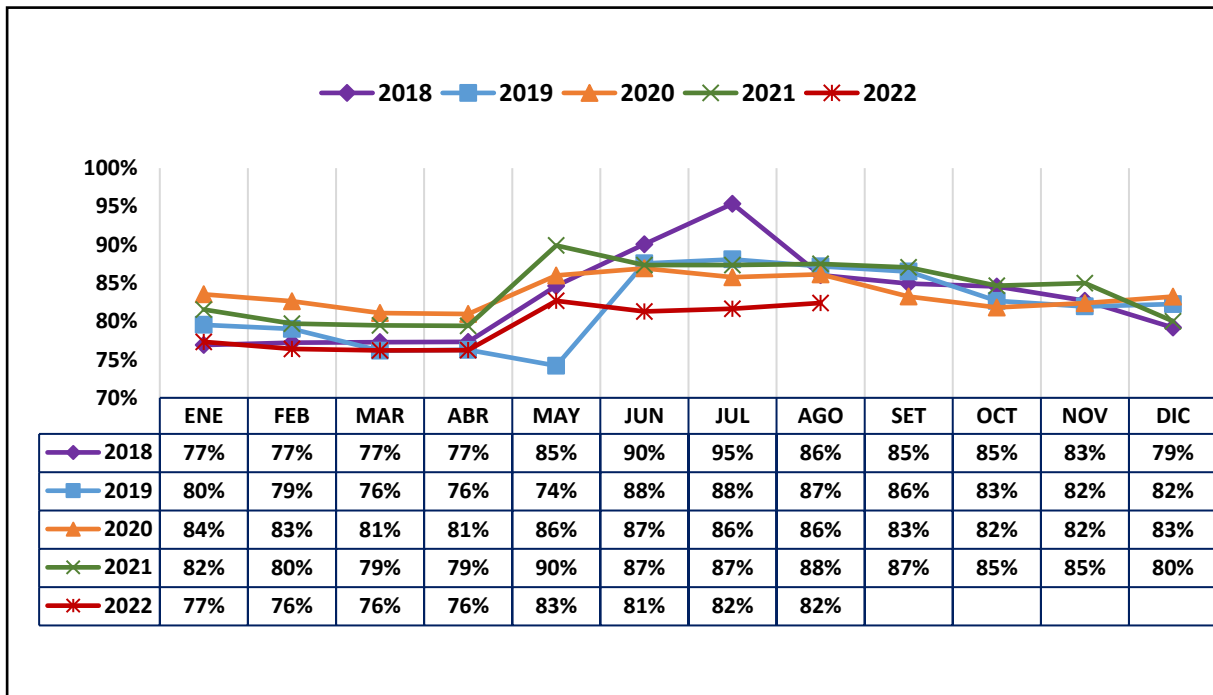


4.2.2.3 Humedad relativa

La humedad relativa aumenta entre los meses de mayo a agosto, llegando a valores sobre 80% y picos de 95%. Esto va de la mano con la temperatura, donde desde mayo hasta agosto hay menor temperatura y la evaporación del agua en el ambiente es lenta por la presencia de mayor cantidad de neblina (Figura 12).

Figura 12

Humedad relativa (%) mensual durante el periodo 2018 al 2022

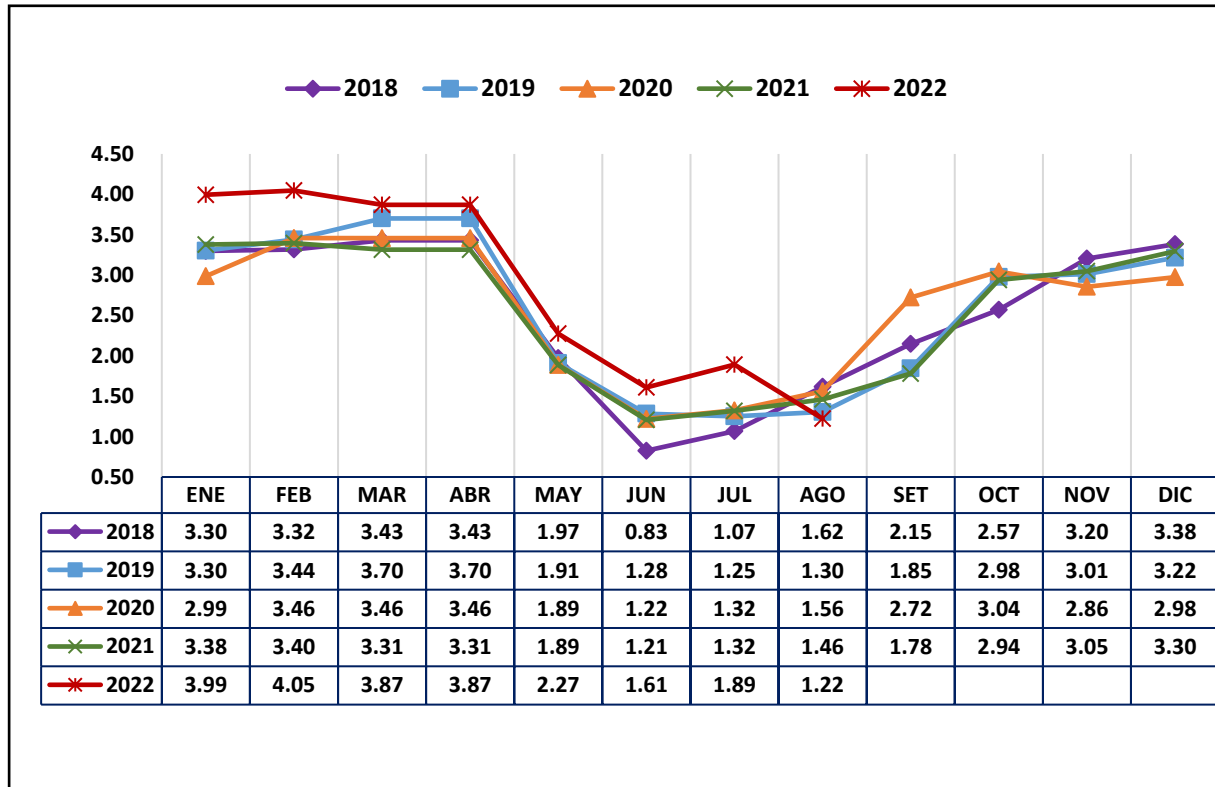


4.2.2.4 Evapotranspiración de referencia (ET_o)

En la Figura 13 se observa que los mayores valores de evapotranspiración de referencia ocurren en los meses de enero a abril, donde se supera los 3 mm de promedio diario, mientras que los valores más bajos se observan entre los meses de mayo a agosto, donde se está por debajo de 2 mm.

Figura 13

Evapotranspiración de referencia (mm) promedio diario del mes durante el periodo 2018 al 2022



4.2.3 Antecedentes edáficos

4.2.3.1 Desuniformidad y estratificación del suelo

Respecto a la clase textural, se tiene lotes muy heterogéneos que van desde el franco arenoso hasta el franco arcilloso, pasando por clases intermedias. El común de los huertos de palto en estado de decaimiento presentaba suelos desde textura franca hasta franco arcillosa. Reynolds et al. (2009) refieren que los suelos no óptimos, con pobre capacidad de aire, pobremente estructurados y baja estabilidad estructural, tienen mayores proporciones de poros pequeños y una excesiva retención de agua comparado a los suelos de óptima calidad física.

Para efectos del presente Trabajo de Suficiencia Profesional se trabaja con la data de los suelos de textura franca, por corresponder a la mayoría de los huertos problema. En el lugar de estudio del valle de Chíncha, los suelos que se tienen de textura franca presentan un rango promedio de arena entre 45 a 50%, limo entre 25 a 35% y arcilla entre 18 a 25%.

A continuación, en las Tablas 15 a 18 se muestran los resultados de resistencia mecánica a la penetración, conductividad eléctrica del suelo, temperatura y contenido de humedad volumétrica de cuatro muestreos realizados el año 2016 a campos compactados con textura franca (4 lotes muestreados que corresponden a 4 fundos diferentes). Durante el análisis se observó una marcada estratificación a nivel de perfil con distinto grado de compactación a nivel de estratas. Asimismo, se enfatiza que este análisis se realizó antes de ejecutar las estrategias de manejo de suelo.

Tabla 15

Monitoreo de salinidad, temperatura, contenido volumétrico de agua y resistencia a la penetración de suelo (fundo 1), antes de ejecutar las estrategias de manejo de suelo

Centro del camellón				
Profundidad cm	Conductividad eléctrica dS m ⁻¹	Temperatura ° C	Contenido de humedad volumétrica % v/v	Resistencia a la penetración kPa
0 – 10	1.2	23.0	32.2	1 200
10 – 20	2.4	26.3	35.4	2 200
30 – 60	2.8	24.6	36.3	2 400
60 – 90	0.7	24.2	28.1	910

Nota: Evaluación realizada el año 2016. Las clases texturales fueron determinadas en laboratorio y de acuerdo a la profundidad se obtuvo: franco arenoso de 0 - 10 cm, franco de 10 – 20 y 30 – 60 cm y franco arenoso de 60 - 90. La conductividad eléctrica, contenido de humedad volumétrica y temperatura se midió con sondas portátiles de capacitancia FDR (ProCheck, marca: decagon devices). La resistencia a la penetración se obtuvo con el penetrómetro de punta cónica. El muestreo se realizó 24 horas después de haber dado un riego de saturación de 120 m³ (aproximadamente 3 veces la lámina de agua correspondiente a un riego normal).

Tabla 16

Monitoreo de salinidad, temperatura, contenido volumétrico de agua y resistencia a la penetración de suelo (fundo 2), antes de ejecutar las estrategias de manejo de suelo

Centro del camellón				
Profundidad cm	Conductividad eléctrica dS m⁻¹	Temperatura ° C	Contenido de humedad volumétrica % v/v	Resistencia a la penetración kPa
0 – 10	1.5	25.3	29.4	1 250
10 – 20	2.7	24.2	37.2	2 940
30 – 60	2.4	25.6	34.5	2 830
60 – 90	1.1	23.4	24.8	1 150

Nota: Evaluación realizada el año 2016. Las clases texturales fueron determinadas en laboratorio y de acuerdo a la profundidad se obtuvo: franco arenoso de 0 - 10 cm, franco de 10 – 20 y 30 – 60 cm y franco arenoso de 60 - 90. La conductividad eléctrica, contenido de humedad volumétrica y temperatura se midió con sondas portátiles de capacitancia FDR (ProCheck, marca: decagon devices). La resistencia a la penetración se obtuvo con el penetrómetro de punta cónica. El muestreo se realizó 24 horas después de haber dado un riego de saturación de 120 m³ (aproximadamente 3 veces la lámina de agua correspondiente a un riego normal).

Tabla 17

Monitoreo de salinidad, temperatura, contenido volumétrico de agua y resistencia a la penetración de suelo (fundo 3), antes de ejecutar las estrategias de manejo de suelo

Centro del camellón				
Profundidad cm	Conductividad eléctrica dS m⁻¹	Temperatura ° C	Contenido de humedad volumétrica % v/v	Resistencia a la penetración kPa
0 – 10	1.2	24.2	25.5	980
10 – 20	2.3	25.8	35.2	2 830
30 – 60	2.1	24.4	35.8	2 770
60 – 90	1.3	23.7	21.4	960

Nota: Evaluación realizada el año 2016. Las clases texturales fueron determinadas en laboratorio y de acuerdo a la profundidad se obtuvo: franco arenoso de 0 - 10 cm, franco de 10 – 20 y 30 – 60 cm y franco arenoso de 60 - 90. La conductividad eléctrica, contenido de humedad volumétrica y temperatura se midió con sondas portátiles de capacitancia FDR (ProCheck, marca: decagon devices). La resistencia a la penetración se obtuvo con el penetrómetro de punta cónica. El muestreo se realizó 24 horas después de haber dado un riego de saturación de 120 m³ (aproximadamente 3 veces la lámina de agua correspondiente a un riego normal).

Tabla 18

Monitoreo de salinidad, temperatura, contenido volumétrico de agua y resistencia a la penetración de suelo (fundo 4), antes de ejecutar las estrategias de manejo de suelo

Centro del camellón				
Profundidad cm	Conductividad eléctrica dS m⁻¹	Temperatura ° C	Contenido de humedad volumétrica % v/v	Resistencia a la penetración kPa
0 – 10	2.4	24.5	32.7	2 630
10 – 20	2.6	25.1	36.2	2 970
30 – 60	2.7	23.7	38.7	2 740
60 – 90	0.8	23.2	22.3	970

Nota: Evaluación realizada el año 2016. Las clases texturales fueron determinadas en laboratorio y de acuerdo a la profundidad se obtuvo: franco de 0 - 10 cm, de 10 – 20 cm y 30 – 60 cm y franco arenoso de 60 - 90. La conductividad eléctrica, contenido de humedad volumétrica y temperatura se midió con sondas portátiles de capacitancia FDR (ProCheck, marca: decagon devices). La resistencia a la penetración se obtuvo con el penetrómetro de punta cónica. El muestreo se realizó 24 horas después de haber dado un riego de saturación de 120 m³ (aproximadamente 3 veces la lámina de agua correspondiente a un riego normal).

4.2.3.2 Propiedades químicas del suelo

a. Análisis de caracterización del suelo

El análisis de caracterización del suelo indica que la zona de estudio en Chíncha es favorable para el desarrollo de cultivos, presentando zonas que ameritan mayor atención y cuidado, sobre todo en aquellos suelos compactados que en su mayoría corresponden a suelos de textura fina (que corresponden a más del 50% del área en estudio). A continuación, en la Tabla 19 se muestra el consolidado de 50 análisis de caracterización de suelos, correspondiente a suelos de textura franca muestreados en los primeros 60 cm de profundidad entre los años 2010 y 2016 y al interpretar los resultados se obtiene que:

- El pH del suelo fluctúa entre 7.4 – 8.1 y presenta picos (zonas puntuales) de hasta 8.4.

- La conductividad eléctrica del suelo fluctúa entre $0.9 - 2.0 \text{ dS m}^{-1}$, presentando picos (zonas puntuales) de hasta 7.5 (todo esto medido bajo la relación 1:1), este último valor implica un alto riesgo para el cultivo del palto.
- La materia orgánica del suelo es baja y se encuentra en rangos promedio de 0.6 - 1.3%, con picos de 1.9%.
- El carbonato de calcio se encuentra en rangos promedio de 1.6 - 2.5%, lo cual no representa ninguna limitante para el cultivo; sin embargo, tiene picos que llegan hasta 15% y en estos niveles ya empieza a ser un problema que debe trabajarse, sobre todo para el caso del palto.
- La caliza activa se encuentra en un rango promedio de 0.6 - 2.5%, lo cual no representa ningún problema para el cultivo y tiene picos de 3.5% que tampoco significa un problema para el palto.
- El calcio se encuentra en valores altos en el suelo. El calcio disponible fluctúa entre $12 - 23 \text{ mEq } 100 \text{ g}^{-1}$ (con picos de hasta 35). Mientras, el calcio intercambiable está entre $5.7 - 19 \text{ mEq } 100 \text{ g}^{-1}$, con picos de hasta 32, lo cual representa entre un 78 - 93% de saturación de calcio en el suelo respecto a la CIC, con picos de hasta 95%.
- El potasio disponible en el suelo se encuentra en niveles medios a altos, pero se tiene un nivel bajo de porcentaje de potasio intercambiable en el suelo respecto a la CIC. El potasio disponible promedio del suelo fluctúa entre 105 - 402 ppm, con picos de hasta 700; mientras, los valores promedios de potasio intercambiable están entre 0.3 - 0.8 $\text{mEq } 100 \text{ g}^{-1}$ con picos de 1.3, los que representa entre un 1.7 - 3.2% y picos de 5% de saturación de potasio respecto a la CIC, respectivamente.
- El magnesio disponible se encuentra en niveles adecuados, pero se tiene un nivel bajo de porcentaje de magnesio intercambiable en el suelo respecto a la CIC. El valor promedio de magnesio disponible fluctúa entre $0.65 - 2.1 \text{ mEq } 100 \text{ g}^{-1}$, con picos de hasta $5.0 \text{ mEq } 100 \text{ g}^{-1}$. Además, se tiene los valores promedios de magnesio intercambiable entre $0.8 - 2.7 \text{ mEq } 100 \text{ g}^{-1}$, con picos de 4.5, los que representan entre un 3.8 - 7.7% y picos de 12% de saturación de potasio respecto a la CIC, respectivamente.
- Se tiene valores de sodio intercambiable entre $0.04 - 0.6 \text{ mEq } 100 \text{ g}^{-1}$, con picos de hasta 1.2, esto representa entre un 0.17 - 2.2% de saturación de sodio respecto a la CIC y 8.0%, respectivamente, por lo que el sodio no suele ser problema.

Tabla 19*Resultados del análisis de caracterización de suelo durante el periodo 2010 – 2016*

Parámetros	Unidades	Rangos promedio	Picos extremos (zonas puntuales)
Arena	%	45 – 50	
Limo	%	25 - 35	
Arcilla	%	18 - 25	
pH		7.4 – 8.1	8.4
Conductividad eléctrica (dilución 1:1)	dS m ⁻¹	0.9 – 2.0	7.5
Materia orgánica	%	0.6 – 1.3	1.9
Carbonato de calcio	%	1.6 – 2.5	15
Caliza activa	%	0.6 – 2.5	3.5
Nitrógeno total	ppm	180 – 670	1 000
Fosforo disponible	ppm	4.6 – 31.5	50
Potasio disponible	ppm	105 – 402	700
Calcio disponible	mEq 100 g ⁻¹	12 – 23	35
Magnesio disponible	mEq 100 g ⁻¹	0.65 – 2.1	5.0
Boro disponible	ppm	0.23 – 1.8	4.5
Hierro disponible	ppm	4.4 – 24.5	40
Zinc disponible	ppm	0.7 – 7.4	10
Manganeso disponible	ppm	1.6 – 23	40
Cobre disponible	ppm	0.8 – 5.8	15
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	mEq 100 g ⁻¹	11 – 18	35
Calcio intercambiable	mEq 100 g ⁻¹	5.7 – 19	32
Magnesio intercambiable	mEq 100 g ⁻¹	0.8 – 2.7	4.5
Potasio intercambiable	mEq 100 g ⁻¹	0.3 – 0.8	1.3
Sodio intercambiable	mEq 100 g ⁻¹	0.04 – 0.6	1.2
Calcio intercambiable	%	78 – 93	95
Magnesio intercambiable	%	3.8 – 7.7	12
Potasio intercambiable	%	1.7 - 3.2	5.0

Sodio intercambiable	%	0.17 – 2.2	8.0
----------------------	---	------------	-----

Nota: data consolidada de 50 análisis de suelo de textura franca, donde el suelo fue muestreado en los primeros 60 cm de profundidad.

b. Análisis de salinidad del suelo

El análisis de salinidad de la Tabla 20 muestra el consolidado de 35 análisis de salinidad, los cuales corresponden a suelos de textura franca muestreados entre los años 2010 y 2016 dentro de los primeros 60 cm de profundidad. Se aprecia que el suelo en la zona de estudio de Chincha posee condiciones para un buen desarrollo de los palto, pero presenta zonas que ameritan mayor atención y cuidado, sobre todo en aquellos suelos compactados, que tal como se comentó anteriormente, en su mayoría corresponden a suelos de textura fina y conforman más del 50% del área en estudio. Al interpretar los resultados de la Tabla 20 se encontró que:

- El pH promedio del suelo fluctúa entre 7.1 – 8.2, con picos (zonas puntuales) de hasta 8.4.
- La conductividad eléctrica promedio del suelo fluctúa entre 1.3 – 2.7 dS m⁻¹, con picos (zonas puntuales) de hasta 12 dS m⁻¹ (todo esto bajo la metodología extracto de saturación), lo que implica un alto riesgo para el cultivo del palto.
- El cloruro soluble promedio fluctúa entre 1.2 – 3.0 mEq L⁻¹, el cual no representa ningún riesgo para el cultivo. Los picos en sitios específicos llegan hasta 20 mEq L⁻¹, los cuales significan un riesgo muy alto para el palto. Se procura no superar los 3.0 mEq L⁻¹ de cloruro disuelto.
- El sodio soluble promedio fluctúa entre 2.2 – 4.5 mEq L⁻¹, con picos en sitios específicos de hasta 30 mEq L⁻¹, que representan un riesgo muy alto para el palto. Se procura no superar los 3.0 mEq L⁻¹ de sodio disuelto.

Tabla 20*Resultados del análisis de salinidad de suelo durante el periodo 2010 - 2016*

Parámetros	Unidades	Rangos promedio	Picos extremos (zonas puntuales)
pH		7.1 – 8.2	8.4
CEes	dS m ⁻¹	1.3 – 2.7	12
Calcio soluble	mEq L ⁻¹	3.2 – 12	60
Potasio soluble	mEq L ⁻¹	0.27 – 3.6	12
Magnesio soluble	mEq L ⁻¹	0.75 – 11	20
Sodio soluble	mEq L ⁻¹	2.2 – 4.5	30
H ₂ PO ₄ ⁻ soluble	ppm	1.3 – 4.3	5.0
Nitrato soluble	mEq L ⁻¹	1.5 – 11	30
Sulfato soluble	mEq L ⁻¹	1.7 - 35	60
Bicarbonato soluble	mEq L ⁻¹	1.5 – 4.5	12
Cloruro soluble	mEq L ⁻¹	1.2 - 3	20
Zinc soluble	ppm	0.05 – 0.18	0.4
Hierro soluble	ppm	0.22 – 2.1	4.0
Boro soluble	ppm	0.4 – 1.30	5.0

Nota: CEes: conductividad eléctrica en extracto de saturación. Data consolidada de 35 análisis de suelo de textura franca, donde el suelo fue muestreado en los primeros 60 cm de profundidad.

4.2.4 Antecedentes de la calidad del agua de riego

El agua del subsuelo (pozo) en la zona de estudio de Chíncha es de buena calidad para el cultivo de palto y de acuerdo a la Tabla 21 se caracteriza por tener:

- El pH entre 7.1 – 7.5, lo cual es adecuado para el palto, pero se tiene pozos específicos con picos de 8.2.
- La conductividad eléctrica fluctúa entre 0.5 – 1.2 dS m⁻¹, lo cual está bien para el palto. Además, se tiene picos extremos (pozos específicos) entre 2.5 - 3.5 dS m⁻¹ que representan un problema serio para el palto.

- El sodio soluble fluctúa entre $0.6 - 2.5 \text{ mEq L}^{-1}$, lo cual es aceptable para el palto, pero los picos extremos (pozos específicos) de 10 mEq L^{-1} representan un serio problema para el cultivo.
- El cloro soluble fluctúa entre $0.4 - 3.5 \text{ mEq L}^{-1}$, lo cual está bien para el palto, aunque 3.5 mEq L^{-1} merece mayor atención. Se presentan picos extremos (pozos específicos) de 20 mEq L^{-1} , los cuales son problema para el palto.
- La relación de adsorción de sodio (RAS) tiende a ser < 1.0 , lo cual indica que no hay problema de regar debido a la contribución de sodio al suelo. Tiene picos extremos (pozos específicos) de RAS de 5.0, aunque no es un problema, amerita prestar atención.
- El boro soluble en agua fluctúa entre $0.1 - 0.35 \text{ ppm}$, lo cual no afecta al palto. Sus picos extremos en pozos específicos son de 0.7 ppm , que son un riesgo de acumulación en suelo y posible fitotoxicidad a nivel foliar.
- El calcio soluble se encuentra en alta concentración en el agua, fluctuando entre $60-160 \text{ ppm}$, con picos (pozos específicos) de 500 ppm . Esto es un indicador de la posible acumulación de calcio en el suelo, el consecuente antagonismo frente a los demás cationes y un fuerte poder cementante en el suelo, entre otros.

Tabla 21*Resultados del análisis químico del agua de riego durante el periodo 2010 - 2016*

Parámetros	Unidades	Rangos	Picos extremos (pozos puntuales)
pH		7.1 – 7.5	8.2
Conductividad eléctrica	dS m ⁻¹	0.5 – 1.2	2.5 - 3.5
Calcio soluble	ppm	60 – 160	500
Potasio soluble	ppm	2.0 – 3.8	5.0
Magnesio soluble	mEq L ⁻¹	0.4 – 1.3	2.5
Bicarbonato soluble	mEq L ⁻¹	3.0 – 5.5	6.5
Sulfato soluble	mEq L ⁻¹	1.2 – 3.0	3.8
Nitrato soluble	mEq L ⁻¹	0.2 – 1.0	2.0
Sodio soluble	mEq L ⁻¹	0.6 – 2.5	10
Cloruro soluble	mEq L ⁻¹	0.4 – 3.5	20
Boro Soluble	ppm	0.1 – 0.35	0.7
Relación de adsorción de sodio (RAS)		< 1.0	5.0

Nota: data consolidada correspondiente a 50 análisis de agua de riego. Está referido a agua de subsuelo.

4.2.5 Antecedentes de la calibración de los equipos de riego por goteo

En el año 2016 se encontró promedios de coeficiente de uniformidad (CU) de riego entre 65 - 80% y situaciones extremas de hasta 50%, con desviaciones por debajo de la presión objetivo de las válvulas de campo del orden del 5 al 20%. Además, la mayoría de huertos tenía mangueras de 10 a más años de antigüedad y con escaso mantenimiento previo.

Respecto a las mangueras de riego, en su mayoría de campos se utiliza mangueras desde clase 16 mil hasta clase 25 mil, con distanciamiento entre goteros de 40 cm, caudales entre 1.6 a 1.8 L h⁻¹ y en su mayoría 2 líneas de manguera por fila de plantas (existiendo lotes con 3 líneas). Se trabaja con presiones objetivo en las válvulas de campo entre 1.2 a 1.4 bar, dependiendo de cada diseño del sistema de riego.

En la Figura 14 se muestra un huerto con un nivel de obturamiento de goteros severo (50% de coeficiente de uniformidad).

Figura 14

Huerto con nivel de obturamiento de goteros severo (50% de coeficiente de uniformidad)



4.2.6 Antecedentes del estado sanitario de los huertos

En el año 2016 se encontró una incidencia moderada a fuerte del hongo de madera, *Lasiodiplodia theobromae*, conocido como “el hongo del estrés” porque su presencia generalmente está asociado al grado de estrés de la planta. Respecto a la *Phytophthora cinnamomi*, entre el 5 a 7% de las plantas de palto presentaban síntomas visibles de esta enfermedad, acentuado en suelos con problemas de compactación y encharcamiento.

4.3 Estrategias implementadas que mejoraron la calidad física del suelo

4.3.1 Subsulado de post-plantación

El subsulado actúa rompiendo capas duras del suelo y a su vez genera nuevos espacios porosos (sobre todo macroporos), disminuye la densidad aparente debido al aumento del volumen del suelo, aumenta la velocidad de infiltración y mejora la capacidad de difusión de gases. Finalmente, se logra una recuperación del sistema radicular de las plantas y de su desarrollo vegetativo, demorando esta última entre dos a tres temporadas en expresarse, tal como lo indicaron Sellés et al. (2012).

En el año 2017, durante el periodo de post-cosecha, se realizó a modo de prueba el subsulado de “entre hileras” (conocido también como “subsulado de calle”). Se utilizó un subsolador de dos puntas acoplado a un tractor y el trabajo se realizó en dos lotes de textura franca y un lote de textura franco arcilloso, estos tres lotes presentaban problemas de compactación. En el año 2018 se subsoló el 80% de los lotes de palto de la Corporación y el 2019 el 100%. En el 2020 se subsoló al 20% de lotes que no se subsolaron el año 2018 y el 2021 se subsoló nuevamente al 100% de los huertos, mientras que en el año 2022 ya no se subsoló. A través de la observación de los resultados al día de hoy, se definió la política de subsolar “entre hileras” por dos años consecutivos y luego dejar de subsolar por un año, y así sucesivamente (acompañado de monitoreos de suelo de resistencia mecánica a la penetración). Otra estrategia que aún está en evaluación, es subsolar todos los años una calle sí y la otra no (ósea el 50% de las calles del lote) y el siguiente año se subsola el otro 50%, y así sucesivamente.

En el año 2019, de manera complementaria al subsulado “entre hileras”, se incluyó también el subsulado de “entre plantas” (conocido como “garreo”), haciendo uso de un tridente acoplado a una miniexcavadora y se realizó en dos lotes de textura franca y un lote de textura franco arcilloso, subsolando a un lado por planta, cabe resaltar que ambos lotes fueron con los que inicialmente se ensayó el subsulado de “entre hileras”. Para el año 2020 y 2021, se subsoló alrededor del 70% de los lotes de palto de la Corporación, a los cuales a la mitad de lotes se le subsoló a un lado por planta y a la otra mitad en ambos lados por planta porque al 30% de lotes restantes no se vio la necesidad de realizarles el subsulado “entre plantas”, en su mayoría de clase textural franco arenosa. En el año 2022 no se realizó el subsulado “entre plantas” y actualmente, dado los resultados obtenidos, se definió la política de subsolar un año a un lado por planta y al siguiente año completar el lado faltante, luego el subsiguiente año no subsolar, y así sucesivamente.

Cabe especificar que dentro de las primeras 12 horas de haber realizado el trabajo, se inyecta vía sistema de riego, los fungicidas hymexazol y metalaxyl.

A continuación, se detallan ambas técnicas de subsolado:

a. Subsólado post-plantación “entre hileras”

Este es un subsolado que se dirige de forma paralela a la línea de plantación a una profundidad de corte mínima de 55 cm (ideal > 70 cm) con el objetivo de disminuir el efecto de la compactación del suelo y promover una nueva generación de raíces en las zonas de corte (Figura 15).

Figura 15

Subsolado post-plantación “entre hileras”



b. Subsulado post-plantación “entre plantas”

El subsulado de post-plantación “entre plantas”, conocido también como “garreo”, utiliza un tridente que penetra sobre el mismo camellón a una profundidad de 1 m, tal como se presenta en la Figura 16. Es una técnica complementaria al subsulado de “entre calles” y permite ampliar el área de corte. Se aprecia una nueva emisión de raíces después de los 45 días de ejecutada la labor, tal como se muestra en la Figura 17.

Figura 16

Subsulado post-plantación “entre plantas”



Figura 17

Emisión de raíces nuevas a los 45 días post subsolado “entre plantas”



4.3.2 Incorporación de materia orgánica y la práctica del “mulching”

Durante los años 2017 y 2018, en la etapa de post-cosecha, se incorporó por dos años seguidos 20 kg de vermicompost por planta (equivale a 8.3 t ha⁻¹), el cual se distribuyó debajo la línea de manguera en ambos lados del árbol, posteriormente se cubrió con “mulch” (el “mulch” está referido a la hojarasca acumulada sobre el camellón). Cabe especificar, que en algunas zonas que estuvieron desprovistas de “mulch” se recolectó hojarasca y se cubrió los espacios vacíos. La incorporación de vermicompost se repitió en los años 2020 y 2021. De manera complementaria, se viene inyectando mensualmente ácido húmico a razón de 10 L ha⁻¹ durante todo el año.

Esta estrategia se realizó con el objetivo de aumentar la materia orgánica del suelo (la cual se encuentra en la mayoría de huertos por debajo del 1%), reducir riesgos de compactación superficial del suelo y de salinidad, mejorar la porosidad (en especial la macroporosidad), mejorar la actividad biológica del suelo, entre otros, lo cual permitiera “recrear” un ambiente más propicio para las raíces superficiales del palto. En la zona de estudio es común encontrar problemas de “sellado o encostrado superficial” del suelo, el cual está relacionado a cierto estado de compactación del mismo, ya que denota una reducción en la porosidad e incremento en la densidad aparente. Según Lobo y Pulido (2006), no son otra cosa que una forma de

degradación de la estructura superficial del suelo y debido a que ocurren en la interfase suelo/atmósfera, impactarán significativamente en el intercambio hídrico y gaseoso entre los dos medios, interfiriendo en el desarrollo de las plantas. Este problema generalmente se refiere al desarrollo de una capa superficial de suelo con una reducción significativa en la porosidad y permeabilidad del suelo, formándose como resultado de un rápido humedecimiento del suelo seco (por ejemplo influenciado fuertemente por las lluvias en zonas tropicales) y a un posterior secado que dará origen a una capa superficial con una alta resistencia mecánica, la cual es comúnmente denominada "encostramiento o costra del suelo" y cuyas causas están relacionadas a un depósito del material fino en el suelo, a un bajo contenido de materia orgánica, a la presencia de agentes dispersantes (como por ejemplo el sodio y/o magnesio intercambiable) y/o alguna combinación de estos procesos. Asimismo, son los suelos desnudos los más susceptibles a este proceso de degradación porque sus agregados están sujetos al impacto climático, y es aún más proclive en aquellos suelos con altos contenidos de limo (debido a su elevada susceptibilidad a la dispersión) y de arcilla (es importante considerar la mineralogía de las arcillas presentes). Pla (2014) sostiene que la sodicidad origina cambios en las propiedades físicas de los suelos, tanto por dispersión de partículas de arcilla y limo y posterior taponado de los poros por dichas partículas en el agua percolante y bloqueo de los poros por las arcillas expandibles, luego este taponado de los poros del suelo superficial (por las partículas dispersas) suele provocar el "sellado" superficial del suelo que limita la infiltración y provoca anegamiento superficial.

A continuación, en la Figura 18 se muestra el encostrado de suelo.

Figura 18

Encostrado superficial del suelo



En la Figura 19 se aprecia la incorporación de vermicompost y “mulch” sobre el camellón en plantas adultas y sus resultados a los 90 días son evidenciados en la Figura 20. En la Figura 21 se aprecia la incorporación de “mulch” sobre el camellón en plantas en crecimiento.

Figura 19

Incorporación de vermicompost y “mulch” sobre el camellón en un huerto de plantas adultas



Figura 20

Resultados a los 90 días posteriores a la incorporación del vermicompost y “mulch” en un huerto de plantas adultas



Figura 21

Incorporación de vermicompost y “mulch” sobre el camellón en un huerto de plantas en crecimiento



4.3.3 Estrategias de riego que tengan en consideración el balance agua/oxígeno

Para tener un adecuado desarrollo de la parte aérea y radicular del palto, es necesario mantener un adecuado equilibrio de agua/aire en el suelo, lo cual es más complejo de manejar en aquellos suelos de textura fina y más aún si presentan cierto estado de compactación porque después de un riego se disminuye rápidamente la aireación del suelo (debido a su baja macroporosidad) y el drenaje de los poros de mayor diámetro se produce lentamente hasta llegar a capacidad de campo (Lemus et al, 2010).

En la Figura 22 se puede apreciar un campo de palto en estado de decaimiento (año 2016) con un rendimiento de 5.0 t ha^{-1} y cultivado en un suelo de textura franca que presenta una macroporosidad de 8.0% (Predicción software SPAW, USDA).

Figura 22

Huerto de palto en estado de decaimiento causado por asfixia radicular (8% de macroporosidad)



Nota: Huerto correspondiente a un suelo de textura franca que presenta una macroporosidad de 8.0% (Predicción software SPAW, USDA).

Para profundizar en este análisis, se parte del concepto de que la cantidad de agua disponible para la planta es la humedad aprovechable (HA) y está comprendida entre dos valores límites, uno superior que se denomina capacidad de campo (CC) y otro inferior que se denomina porcentaje de marchitez permanente (PMP). El rango óptimo de contenido de agua para el desarrollo de las plantas se ubica entre un valor cercano a la capacidad de campo y un límite inferior conocido como umbral de riego (UR), que es un contenido de humedad bastante superior al porcentaje de marchitez permanente (Ferreyra y Sellés, 2013). El umbral de riego es el porcentaje de humedad aprovechable que puede agotarse en el suelo antes de realizar el próximo riego, sin que se agote en demasía para no afectar el crecimiento de las plantas por un déficit hídrico (Lemus et al, 2010). Esta fracción recibe el nombre de Umbral de Riego (UR) o fracción de agotamiento "p" y varía según el tipo de cultivo. Para el caso del palto es de 0.7 (Allen et al, 1998). Según investigaciones del INIA Chile, cuando se tiene suelos con tendencia a la asfixia radicular se sugiere utilizar valores entre 0.55 a 0.65 (R. Ferreyra, comunicación personal, 07 de setiembre de 2022).

Para realizar un programa de riego, además de considerar los requerimientos hídricos, es necesario analizar las condiciones físicas del suelo en forma integral, observando las posibles

interacciones entre la porosidad, aireación, densidad aparente, entre otros; y las constantes hídricas propia del suelo. Ferreyra y Sellés (2013) indican que la programación de riego consiste en estimar el agua requerida por el cultivo para su desarrollo, en la cantidad y momento adecuado y se divide en dos etapas: una predictiva que corresponde a la programación propiamente dicha y una etapa de control de la misma, a través de la cuantificación de la humedad del suelo y/o el estado hídrico de la planta. La etapa predictiva define el tiempo y la frecuencia de riego y se debe de considerar los siguientes factores para un adecuado cálculo:

- i. Condiciones del clima, que determinan la demanda evaporativa de la atmósfera o la evapotranspiración de referencia (ET_o).
- ii. Características propias del cultivo, como son su estado de desarrollo, el período fenológico (coeficiente K_c) y la distribución del sistema radicular.
- iii. Características propias del suelo, tales como capacidad de retención de humedad, aireación, profundidad y su variabilidad espacial, entre otras.
- iv. Características propias del equipo de riego, por ejemplo, en el caso del riego por goteo, considerar la eficiencia de aplicación del agua de riego (E_{fa}), la intensidad de precipitación real del equipo (IPP), entre otras.

Por ello, en base a la experiencia de Ferreyra y Sellés (2013), en la Tabla 22 se relaciona las propiedades físicas del suelo con los coeficientes hídricos, donde se considera:

- Porosidad total (ft), que corresponde a la fracción de volumen del suelo que está ocupada por aire o agua y se calculó mediante la fórmula ($ft = 1 - \rho_b / \rho_s$), donde ρ_b es la densidad aparente y ρ_s es la densidad de partícula (Lal y Shukla, 2004). Para efectos del cálculo se utilizó una densidad de partícula de 2.65 g cm^{-3} . La porosidad se relaciona con la textura, pero depende también en gran medida del grado de agregación (estructura), influenciado por el contenido de materia orgánica o la compactación que el suelo presente.
- Capacidad de aire del suelo (CA), corresponde al porcentaje de aire que tiene el suelo cuando este se encuentra con un contenido de humedad a capacidad de campo (CC), es un buen estimador de la macroporosidad del suelo, por lo que muchas veces se habla indistintamente de capacidad de aire o macroporosidad. La capacidad de aire se puede estimar de la siguiente manera: $CA = ft\% - (CC\% \times \rho_b)$, donde CA = capacidad de aire del suelo, ft% = porosidad total del suelo, CC% = contenido gravimétrico de agua a capacidad de campo, ρ_b = densidad aparente del suelo (g cm^{-3}).

- Agua disponible total o humedad aprovechable (ADT), la cual se calcula mediante la siguiente expresión: $ADT \text{ (mm)} = [(CC\% - PMP\%) / 100 \times \rho_b] \times H \times (1 - Pied) \times PSM$, donde: CC% = capacidad de campo del suelo en base peso (%), PMP% = Porcentaje de marchitez permanente en base peso (%), ρ_b = densidad aparente del suelo (g cm^{-3}), H = profundidad de raíces (mm), Pied = fracción de piedras presentes en el perfil de suelo, PSM = fracción de suelo mojado por los emisores de riego que corresponde a la fracción de suelo que mojan los emisores cuando se riega por goteo y se asume un valor entre 0.4 y 0.6 (Ferreira y Sellés, 2013).
- No toda el agua disponible total del suelo está igualmente “disponible” para las plantas, por lo cual es necesario regar cuando se agote un porcentaje del ADT del suelo (fracción de agotamiento "p") y esto nos da el Agua Fácilmente Aprovechable (AFA) para las plantas, que se define como la cantidad de agua que las plantas pueden extraer del suelo antes de volver a regar y es lo que se debe de reponer (mm).

Tabla 22*Relación entre las propiedades físicas del suelo y sus coeficientes hídricos*

Textura del suelo	Porosidad total (ft) (%)	CA %	pb g cm⁻³	CC (en peso) %	PMP (en peso) %	ADT=CC-PMP (en peso) %	ADT (en vol) %
Arenoso	38 (32 - 42)	23.15	1.65 (1.55 – 1.80)	9 (6 - 12)	4 (2 - 6)	5 (4 - 6)	8.25 (6.2 – 10.8)
Franco arenoso	43 (40 - 47)	22.0	1.5 (1.40 – 1.60)	14 (10 - 18)	6 (4 - 8)	8 (6 - 10)	12 (8.4 - 16)
Franco	47 (43 - 49)	16.2	1.4 (1.35 – 1.50)	22 (18 - 26)	10 (8 - 12)	12 (10 - 14)	16.8 (13.5 - 21)
Franco arcilloso	49 (47 - 51)	12.5	1.35 (1.30 – 1.40)	27 (23 - 31)	13 (11 - 15)	14 (12 - 16)	18.9 (15.6–22.4)
Arcillo arenoso	51 (49 - 53)	10.77	1.3 (1.25 – 1.35)	31 (27 - 35)	15 (13 - 17)	16 (14 - 18)	20.8 (17.5–24.3)
Arcilloso	53 (51 - 55)	9.25	1.25 (1.20 – 1.30)	35 (31 - 39)	17 (15 - 19)	18 (16 - 20)	22.5 (19.2 – 26)

Nota: CA: capacidad de aire en el suelo, pb: densidad aparente, CC: capacidad de campo, PMP: porcentaje de marchitez permanente, ADT: agua disponible total o humedad aprovechable. Adaptado de *Manual de riego para frutales: Uso eficiente del agua de riego y estrategias para enfrentar períodos de escasez*, por R. Ferreyra y G. Sellés, 2013, p. 24, Boletín INIA N° 278. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

4.3.4 Riegos con fracciones de lavado (FL)

Dentro de las estrategias de riego se incluyó también los riegos con fracciones de lavado debido a la presencia de sales en el suelo; por ello, se aplica un mayor volumen de agua que permita su infiltración y lixiviación. Ferreyra y Sellés (2013) comentan que a esta cantidad de agua se le denomina fracción o necesidades de lavado (FL) y se le define como la fracción del agua que penetra en el suelo y sobrepasa el sistema de raíces y para el caso de riegos localizados, el cálculo de la fracción de lavado (FL) es el siguiente:

$$FL = EC_w / (2 \times EC_e)$$

donde:

FL corresponde a los requerimientos de lavado para evitar daño por sales.

EC_w es la conductividad eléctrica del agua de riego ($dS\ m^{-1}$).

EC_e es la conductividad eléctrica del extracto saturado de suelo que afecta el desarrollo del cultivo ($dS\ m^{-1}$).

Para efectos del cálculo se considera los siguientes valores:

EC_w : $0.85\ dS\ m^{-1}$ (promedio utilizado de la Tabla 21 referido a análisis químico del agua de riego)

EC_e : $1.3\ dS\ m^{-1}$ (de acuerdo con Ayers y Westcot, 1976)

Por lo tanto:

$$FL = 0.85 / (2 \times 1.3) = 0.55$$

En base a los cálculos de la etapa predictiva de la programación de riego que se analiza en el subcapítulo 5.1.2, la necesidad neta de agua del cultivo (NN) es de $3.15\ mm\ día^{-1}$ y la necesidad bruta de agua del cultivo (NB) de $3.32\ mm\ día^{-1}$. Cuando se tiene la necesidad de lavar sales e incluir fracciones de lavado (FL) dentro de una fórmula, hay un pequeño cambio que se realiza en la fórmula de la necesidad bruta de agua (NB) y se modifica de la siguiente manera:

$$NB = NN / (1 - FL) = 3.15 / (1 - 0.55) = 7.04\ mm$$

En nuestro caso, esta fórmula normalmente nos obligaba a aplicar excesivos volúmenes de riego y dada las condiciones físicas de nuestro suelo, consideramos que se correría riesgos innecesarios. Por tal motivo, preferimos aumentar entre un 20 a 30% más de la lámina de riego que equivaldría a la fracción de lavado, en función al monitoreo de sales que nos indique la necesidad de hacerlo (en algunos casos puede llegar a un adicional del 50% de la lámina de riego).

4.3.5 Control del tránsito de maquinaria agrícola

El uso de maquinaria agrícola puede tener efectos tanto sobre la compactación superficial y en la subsuperficial, tal como lo indican Sellés et al. (2012), en donde la compactación superficial está relacionada a la presión de contacto de las ruedas de las máquinas al transitar sobre el suelo que ocasionan una disminución en las condiciones de infiltración del agua en el suelo y provocan anegamientos temporales, mientras que la compactación sub-superficial tiene que ver más con el peso de la maquinaria, en particular el peso por eje; es decir, con el peso total de la maquinaria dividido por el número de ejes que posee se puede compactar de 30 a 40 cm de profundidad, provocando una zona de baja macroporosidad y malas condiciones de aireación que afectan el desarrollo radicular de las plantas en esta zona. Adicionalmente, el número de pasadas de la maquinaria, incluso de bajo peso por eje, también afecta la compactación sub-superficial y puede perdurar por largo tiempo. Por lo tanto, se tiene un control estricto en evitar realizar aplicaciones que no estén técnicamente justificadas.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Etapa predictiva de la programación de riego

A continuación, se muestran los resultados de la etapa predictiva de riego, en la cual se tiene en consideración no solo las condiciones climáticas y propias de la planta, sino también las posibles interacciones entre las propiedades físicas del suelo y el comportamiento de sus constantes hídricas. Asimismo, se describe dos ejemplos predictivos del programa de riego, uno correspondiente previo al trabajo de manejo de suelo y otro posterior al mismo.

5.1.1 Ejemplo de programación predictiva de riego antes de realizar las estrategias de manejo de suelo (año 2016)

En la Tabla 23 se muestra el consolidado de suelos de textura franca, correspondiente a 25 análisis de las propiedades físicas de suelos encontrados en el periodo del 2010 al 2016, a una profundidad de 30 cm (este análisis se realizó antes de ejecutar las estrategias de manejo de suelo). Cabe resaltar, que en todos los casos el suelo se encontró en estado de compactación. Para efectos de estos cálculos, las características del agua del suelo fueron modeladas por el programa “Soil Water Characteristics”, incluido en la instalación SPAW (Saxton et al., 2006; Saxton y Willey, 2005), el cual simula la tensión del agua del suelo, la conductividad y la capacidad de retención de agua en función de la textura del suelo, considerando ajuste en el contenido de grava, la compactación, la salinidad y la materia orgánica, de acuerdo con las ecuaciones de Saxton-Rawls para características del agua del suelo (Saxton, 2017).

Tabla 23

Consolidado de las propiedades físicas en suelos de textura franca (periodo 2010 - 2016), antes de ejecutar las estrategias de manejo de suelo

Indicadores	Unidades	Antes de las estrategias de	
		manejo del suelo (referido a valores promedio)	Metodología
Densidad aparente	g mL ⁻¹	1.5 – 1.62	Método del cilindro
Porosidad total	%	38.9 – 43.3	Fórmula ($ft = 1 - \rho_b / \rho_s$)
Porosidad total	%	37 – 42.3	Predicción software SPAW (USDA)
Capacidad de campo	% v/v	24.5 – 28.3	Predicción software SPAW (USDA)
P. marchitez permanente	% v/v	12.8 – 15.6	Predicción software SPAW (USDA)
Resistencia a la penetración	MPa	2.2 – 2.8	Penetrómetro de punta cónica
Conductividad hidráulica	cm h ⁻¹	0.6 – 1.4	Predicción software SPAW (USDA)
Profundidad efectiva de raíces	m	0.54 – 0.72	Medición directa

Nota: data consolidada de 25 análisis de suelo de textura franca realizado en los primeros 30 cm de profundidad. Los datos de materia orgánica, salinidad, densidad aparente, % arena, % limo y % arcilla se utilizaron para cargar el software. El muestreo se realizó 24 horas después de haber dado un riego de saturación (aproximadamente 2 a 3 veces la lámina de agua correspondiente a un riego normal). Para efectos del cálculo de la porosidad total (ft) se consideró dos metodologías, la primera mediante predicción con el software “SPAW” y la segunda con fórmula ($ft = 1 - \rho_b / \rho_s$), donde ρ_b es la densidad aparente y ρ_s es la densidad de partícula, considerándose una densidad de partícula de 2.65 g cm⁻³.

A continuación, a modo de ejemplo, se realiza la etapa predictiva de la programación de riego utilizando los datos de suelo presentados en la Tabla 23 (referido a un suelo franco compactado).

1. Cálculo de la Evapotranspiración del cultivo (ET_c) = $ET_o \times K_c$ (Allen et al, 1998; Ferreyra y Sellés, 2013), donde ET_o es la evapotranspiración de referencia que normalmente se determina por la ecuación de Penmann- Montheith y el K_c es el coeficiente del cultivo.

Para efectos del presente ejercicio, se considera el mes de diciembre (que coincide con la etapa fenológica de crecimiento inicial de fruta), por lo que se trabaja con un promedio diario de evapotranspiración del cultivo (ET_c) de 3.5 mm y un K_c de 0.9, dando como resultado:

$$ET_c = Eto \times Kc = 3.5 \text{ mm día}^{-1} \times 0.9 = 3.15 \text{ mm día}^{-1}$$

2. Cálculo de la Necesidad Bruta de riego (NB) = NN/Efa (Ferreyra y Sellés, 2013), donde NN es la necesidad neta de agua del cultivo y se calcula con la siguiente fórmula: $NN = ET_c - Pe - Ac$ (Pe es la Precipitación efectiva y Ac es el Ascenso capilar, ambas nulas para el presente cálculo) y Efa es la eficiencia de aplicación del agua de riego. En la eficiencia influye el sistema de riego, el diseño del equipo, su mantenimiento y su manejo. En términos generales, la eficiencia teórica del riego por goteo es de 85-95% (Ferreyra y Sellés, 2013). Para efectos del ejercicio se utiliza el valor de 95%, dado que se había realizado la limpieza de mangueras frente una condición anterior con alto nivel de obturamiento de goteros.

$$NN = 3.15 \text{ mm día}^{-1}$$

$$NB = 3.15/0.95 = 3.32 \text{ mm día}^{-1}$$

3. Cálculo del Tiempo de Riego (TR) = NB/IPP (Ferreyra y Sellés, 2013), donde NB es la Necesidad bruta de riego e IPP es la Intensidad de precipitación del equipo de riego (mm h^{-1}). Para efectos del ejercicio se considera que se utiliza tres mangueras por fila, un caudal de goteros (q_a) de 1.8 L h^{-1} , una distancia entre plantas de 0.4 m y una distancia entre hilera de plantas de 6.0 m.

$$IPP = (3 \times 1.8)/(6 \times 0.4) = 2.25 \text{ mm h}^{-1}$$

$$\text{Tiempo de riego (TR)} = (3.32)/2.25 = 1.47 \text{ horas día}^{-1}$$

4. Cálculo del Agua Disponible Total (ADT) (mm) = $[(CC\% - PMP\%)/100 \times \rho_b] \times H \times (1 - \text{Pied}) \times \text{PSM}$ (Ferreyra y Sellés, 2013), donde:

- Capacidad de campo del suelo (CC) en base volumen (%) varía entre 24.5 – 28.3% y para efectos del ejercicio se utiliza 26.4% con porosidad total (ft) de 41%. La capacidad de aire (CA) es $ft\% - (CC\% \times \rho_b)$ y se considera 14.6%, valor por debajo de lo requerido por el palto que es 30% (Ferreyra et al., 2011).
- Porcentaje de marchitez permanente (PMP) en base volumen (%) fluctúa entre 12.8 – 15.6 y para efectos del ejercicio se utiliza 14.2%.
- Densidad aparente del suelo ($g\ mL^{-1}$) oscila entre 1.5 – 1.62 y para efectos del ejercicio se utiliza $1.56\ g\ mL^{-1}$.
- H = profundidad de raíces (mm) que varía entre 540 – 720 mm y para efectos del ejercicio se utiliza 630 mm.
- Pied = Fracción de piedras presentes en el perfil de suelo y se considera 0 porque no hay efecto de piedras en la zona en estudio.
- PSM = Fracción de suelo mojado entre 0.4 y 0.6 (Ferreyra y Sellés, 2013) y para efectos del presente ejercicio se utiliza 0.5.

$$\text{Agua disponible total (ADT) (mm)} = 38.43\ \text{mm}$$

5. Cálculo del Agua Fácilmente Aprovechable, AFA (mm) = ADT x “p” (Allen et al, 1998; Ferreyra y Sellés, 2013), donde “p” es la fracción de agotamiento y “p” para el caso del palto es de 0.7 (Allen et al, 1998). Según investigaciones del INIA Chile, cuando se tiene suelos con tendencia a la asfixia radicular se sugiere utilizar valores entre 0.55 a 0.65 (R. Ferreyra, comunicación personal, 07 de setiembre de 2022). Para efectos del presente ejercicio se usa valor de 0.55.

$$\text{AFA (mm)} = 21.14\ \text{mm},$$

AFA equivale a la cantidad de agua que las plantas pueden extraer del suelo antes de volver a regar y es lo que se debe de reponer.

6. Finalmente, se determina la frecuencia de riego en días que es $\text{AFA (mm)}/\text{ETc (mm día}^{-1}\text{)}$ (Ferreyra y Sellés, 2013).

$$\text{Frecuencia de riego (días)} = 21.14/3.15 = 6.7\ \text{días (se redondea a 6 o 7 días)}$$

En base a estos resultados predictivos, teóricamente, se regaría cada 6.7 días por un equivalente de $1.47\ \text{horas día}^{-1}$, es decir, el tiempo de riego sería de 8.8 horas si es que la frecuencia de riego fuese cada 6 días o de 10.3 horas si fuese cada 7 días. Por otro lado, el volumen de riego, considerando la NB de $3.32\ \text{mm día}^{-1}$ sería de $199.2\ \text{m}^3\ \text{ha}^{-1}$ o $232.4\ \text{m}^3\ \text{ha}^{-1}$ para frecuencias de 6 o 7 días, respectivamente.

De este ejercicio se desprenden ciertos ajustes al programa predictivo de riego, por ejemplo, el efecto de la marcada estratificación a nivel de perfil que tienen los suelos en el valle de Chíncha (tal como se observó en las Tablas 15 a 18), dado que la primera estrata de la mayoría de suelos corresponde a una textura franco arenosa con menor capacidad de retención de humedad, a la que se suma ciertas situaciones limitantes de suelo, como compactación, salinidad, “encostramientos” superficiales, baja materia orgánica, entre otros, además de la necesidad de mantener humectadas a las raíces superficiales. Por lo tanto, en la etapa de control, en la mayoría de nuestros suelos francos y en este caso compactados, se suele aumentar la frecuencia de riego e introducir 1 a 2 riegos intermedios (de menor volumen), los cuales sirven para mantener humectadas las raíces superficiales y al mismo tiempo evitar aumentar la resistencia a la penetración por déficit hídrico. Posterior a estos riegos intermedios, se suministra el riego normal calculado en el ejercicio teórico, al cual se le suele reducir su lámina de riego debido al efecto de los riegos intermedios. Esto se realiza con la finalidad de mantener las raíces superficiales humectadas, teniendo en cuenta la estratificación a nivel del perfil del suelo de Chíncha y al mismo tiempo con el objetivo de mantener un balance adecuado agua/oxígeno, sobre todo en los suelos con ciertas limitaciones físicas como las mencionadas en el presente trabajo, para evitar por un lado la asfixia radicular y por el otro, aumentar la resistencia mecánica a la penetración. En suelos con problemas de compactación, este concepto se basa en lo que se denomina Intervalo Hídrico Óptimo (IHO). Tormena et al. (1998) definen al Intervalo Hídrico Óptimo, como aquel parámetro físico que incorpora los efectos del contenido de agua en el suelo en las variaciones del suelo respecto a su potencial mátrico, aireación y su resistencia mecánica, donde se ajusta al Intervalo Hídrico Óptimo en función de su límite superior (capacidad de campo) e inferior (punto de marchitez), cuya diferencia es el Agua Disponible, hacia límites más precisos representados por la aireación en el suelo (“nuevo” límite superior) y la resistencia mecánica a la penetración (“nuevo” límite inferior), ambos fuertemente influenciados por la densidad del suelo, por lo que si nos excedemos de estos “nuevos” límites, restringiremos el desarrollo radicular del cultivo.

5.1.2 Ejemplo de programación predictiva de riego después de realizar las estrategias de manejo de suelo (año 2019 - 2022)

En la Tabla 24 se muestra el consolidado de las propiedades físicas de suelo, correspondiente a 25 análisis durante el periodo del 2019 al 2022. Estos análisis fueron realizados en suelos de textura franca y a una profundidad de 30 cm. Cabe indicar que el estado de compactación del suelo fue nulo a leve. Para efectos de estos cálculos, las características del agua del suelo fueron modeladas por el programa “Soil Water Characteristics”, incluido en la instalación SPAW (Saxton et al., 2006; Saxton y Willey, 2005).

Tabla 24

Consolidado de las propiedades físicas en suelos de textura franca (periodo 2019 - 2022), después de ejecutar las estrategias de manejo de suelo

Indicadores	Unidades	Después de las estrategias de	
		manejo del suelo (referido a valores promedio)	Metodología
Densidad aparente	g mL ⁻¹	1.36 – 1.50	Método del cilindro
Porosidad total	%	43.7 – 47.9	Fórmula ($f_t = 1 - \rho_b / \rho_s$)
Porosidad total	%	44.2 – 48.3	Predicción software SPAW (USDA)
Capacidad de campo	% v/v	25.5 – 28.2	Predicción software SPAW (USDA)
P. marchitez permanente	% v/v	12.7 – 15.8	Predicción software SPAW (USDA)
Resistencia a la penetración	MPa	0.4 – 0.9	Penetrómetro de punta cónica
Conductividad hidráulica	cm h ⁻¹	1.7 – 2.8	Predicción software SPAW (USDA)
Profundidad efectiva de raíces	m	0.7 – 1.0	Medición directa

Nota: data consolidada de 25 análisis de suelo de textura franca realizado en los primeros 30 cm de profundidad. Los datos de materia orgánica, salinidad, densidad aparente, % arena, % limo y % arcilla se utilizaron para cargar el software. El muestreo se realizó 24 horas después de haber dado un riego de saturación (aproximadamente 2 a 3 veces la lámina de agua correspondiente a un riego normal). Para efectos del cálculo de la porosidad total (ft) se consideró dos metodologías, la primera mediante predicción con el software “SPAW” y la segunda con fórmula ($ft = 1 - \rho_b / \rho_s$), donde ρ_b es la densidad aparente y ρ_s es la densidad de partícula, considerándose una densidad de partícula de 2.65 g cm^{-3} .

A continuación, a modo de ejemplo, se realiza la etapa predictiva de la programación de riego utilizando los datos de suelo presentados en la Tabla 24, referidos a un suelo franco, no compactado a ligeramente compactado.

1. Cálculo de la Evapotranspiración del cultivo ($ET_c = E_{To} \times K_c$) (Allen et al, 1998; Ferreyra y Sellés, 2013), donde E_{To} es la evapotranspiración de referencia que normalmente se determina por la ecuación de Penman- Montheith y el K_c es el coeficiente del cultivo.

Para efectos del presente ejercicio, se considera el mes de diciembre (que coincide con la etapa fenológica de crecimiento inicial de fruta), por lo que se trabaja con un promedio diario de evapotranspiración del cultivo (ET_c) de 3.5 mm y un K_c de 0.9, dando como resultado:

$$ET_c = E_{To} \times K_c = 3.5 \text{ mm día}^{-1} \times 0.9 = 3.15 \text{ mm día}^{-1}$$

2. Cálculo de la Necesidad Bruta de riego ($NB = NN / E_{fa}$) (Ferreyra y Sellés, 2013), donde NN es la necesidad neta de agua del cultivo y se calcula a través de la siguiente fórmula: $NN = ET_c - P_e - A_c$ que considera a la Precipitación efectiva (P_e) y al Ascenso capilar (A_c) nulas para nuestro caso y E_{fa} es la eficiencia de aplicación del agua de riego. En la eficiencia influye el sistema de riego, el diseño del equipo, su mantenimiento y su manejo. En términos generales la eficiencia teórica del riego por goteo es de 85-95% (Ferreyra y Sellés, 2013). Para efectos del ejercicio se utiliza el valor de 95%, ya que el equipo de riego por goteo se encontraba en condiciones operativas adecuadas.

$$NN = 3.15 \text{ mm día}^{-1}$$

$$NB = 3.15 / 0.95 = 3.32 \text{ mm día}^{-1}$$

3. Cálculo del Tiempo de Riego ($TR = NB / IPP$) (Ferreyra y Sellés, 2013), donde NB es la Necesidad bruta de riego e IPP es la Intensidad de precipitación del equipo de riego

(mm h⁻¹). Para efectos del ejercicio se considera el uso de tres mangueras por fila, un caudal de goteros (qa) de 1.8 L h⁻¹, una distancia entre plantas de 0.4 m y una distancia entre hilera de plantas de 6.0 m.

$$IPP = (3 \times 1.8)/(6 \times 0.4) = 2.25 \text{ mm h}^{-1}$$

$$\text{Tiempo de riego (TR)} = (3.32)/2.25 = 1.47 \text{ horas día}^{-1}$$

4. Cálculo del Agua Disponible Total (ADT) (mm) = [(CC%-PMP%)/100 x ρ_b] x H x (1-Pied) x PSM (Ferreyra y Sellés, 2013), donde:

- Capacidad de campo del suelo (CC) en base volumen (%) que oscila entre 25.5 – 28.2% y para efectos del ejercicio se utiliza 26.9% con porosidad total (ft) de 47%. La capacidad de aire (CA) es ft% - (CC% x ρ_b), considerándose una CA de 20.1%, valor por debajo de lo requerido por el palto que es 30% (Ferreyra et al., 2011).
- Porcentaje de marchitez permanente (PMP) en base volumen (%) que varía entre 12.7 – 15.8 y para efectos del ejercicio se utiliza 14.25%.
- Densidad aparente del suelo (g mL⁻¹) que fluctúa entre 1.36 – 1.5 y para efectos del ejercicio se utiliza 1.43 g mL⁻¹.
- H = profundidad de raíces (mm), las cuales se encuentran entre 700 – 1000 mm y para efectos del ejercicio se utiliza 800 mm.
- Pied = Fracción de piedras presentes en el perfil de suelo y se considera 0 porque no hay efecto de piedras en la zona en estudio.
- PSM = Fracción de suelo mojado con valores entre 0.4 y 0.6 (Ferreyra y Sellés, 2013) y para efectos del presente ejercicio se utiliza 0.5.

$$\text{Agua disponible total (ADT) (mm)} = 50.6 \text{ mm}$$

5. Cálculo del Agua Fácilmente Aprovechable, AFA (mm) = ADT x “p” (Allen et al, 1998; Ferreyra y Sellés, 2013), donde “p” es la fracción de agotamiento y “p” para el caso del palto es de 0.7 (Allen et al, 1998). Según investigaciones del INIA Chile, cuando se tiene suelos con tendencia a la asfixia radicular se sugiere utilizar valores entre 0.55 a 0.65 (R. Ferreyra, comunicación personal, 07 de setiembre de 2022). Para efectos de este ejercicio se utiliza el valor de 0.55.

$$\text{AFA (mm)} = 27.83 \text{ mm,}$$

AFA equivale a la cantidad de agua que las plantas pueden extraer del suelo antes de volver a regar y es lo que se debe de reponer.

6. Finalmente se determina la frecuencia de riego en días que es AFA (mm)/ETc (mm día⁻¹) (Ferreyra y Sellés, 2013).

$$\text{Frecuencia de riego (días)} = 27.83/3.15 = 8.8 \text{ días (se redondea a 8 o 9 días)}$$

En base a estos resultados predictivos, teóricamente, se regaría cada 8.8 días por un equivalente de $1.47 \text{ horas día}^{-1}$, es decir, el tiempo de riego sería de 11.76 horas para una frecuencia de riego de 8 días o sería de 13.23 horas para una frecuencia de riego de 9 días. Por otro lado, el volumen de riego, considerando la NB de 3.32 mm día^{-1} , sería de $265.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ o $298.8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para frecuencias de 8 o 9 días, respectivamente.

En estos campos agrícolas, donde ya se trabajó estrategias de manejo de suelos, igualmente se realiza ajustes al programa predictivo de riego, ya que la estratificación y limitantes del suelo no desaparecen por completo, solo mejoran y lo hacen por un tiempo determinado. Por lo tanto, en la etapa de control, se suele aumentar la frecuencia de riego e introducir 2 a 3 riegos intermedios (de menor volumen) y después se aporta el riego normal (calculado en el ejercicio teórico), al cual se le suele reducir su lámina de riego (debido al efecto de los riegos intermedios). Todo esto con el objetivo de mantener humectadas las raíces superficiales (teniendo en cuenta la estratificación a nivel del perfil del suelo), evitando por un lado condiciones de asfixia radicular y por el otro, el aumento de la resistencia mecánica a la penetración por déficit hídrico.

5.2 Resultados de la etapa de control de la programación de riego

Se introdujo un protocolo específico para la etapa de control de riego, priorizando el método de la calicata que es una técnica muy antigua y de mucha utilidad para monitorear el estado de humedad del suelo y que a su vez permite detectar desuniformidades entre distintos sectores del campo, clases texturales distintas, condiciones de compactación y de estratificación de perfil del suelo, entre otros. En cada turno de riego se evalúa dos veces por semana dos calicatas de 1 m de profundidad y a todo lo ancho del camellón. De esta manera, se obtiene información más real que permita ponderar una estrategia del riego en función a lo observado en cada sector, sin generalizarlo a todo el campo.

Es importante resaltar que, en los últimos años, con la llegada de nueva tecnología, se está dejando de realizar calicatas y esto conlleva a una mayor probabilidad de cometer errores al tratar de inferir variables de riego para todo el fundo. Por lo tanto, es muy importante hacer un

manejo más en sitio-específico. En la Figura 23, el Ing. Raúl Ferreyra evalúa durante una visita a Chincha la presencia de raíces de palto por debajo del 1.0 m de profundidad.

Figura 23

Monitoreo de humedad mediante calicatas en paltos



Complementariamente a las calicatas, se utiliza también tecnología que acompaña a las decisiones de control de riego, entre ellas: sensores fijos y portátiles del tipo FDR (*Frequency Domain Reflectometry*), con el objetivo de medir la humedad volumétrica y relacionarla a la información obtenida en las calicatas. Además, estos sensores brindan información de la temperatura del suelo y conductividad eléctrica. Adicionalmente, también se utilizan tensiómetros, pero cada vez menos.

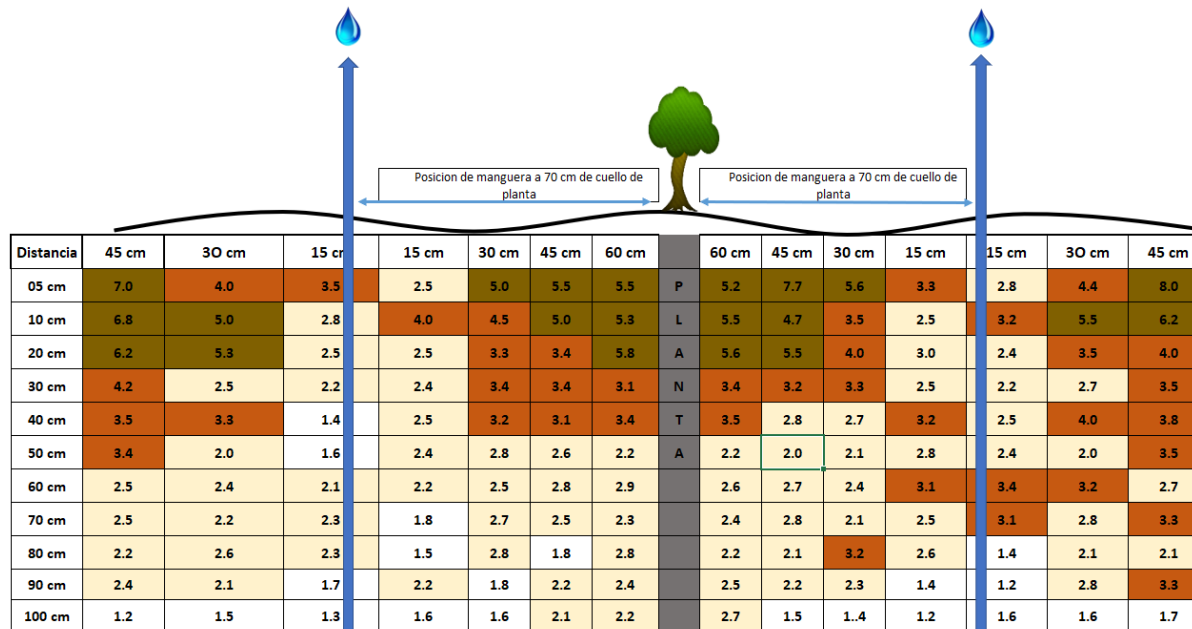
5.3 Resultados de riegos con fracciones de lavado (FL)

En la Figura 24 se aprecia un monitoreo inicial de la conductividad eléctrica en un campo de palto, mediante calicatas, en un suelo salino de textura franco arenosa y con buen drenaje, el cual se realizó antes de iniciar con la estrategia de riegos de lavado. En la Figura 25 se aprecia el mismo lote luego de tres meses de haber incluido los riegos de lavado de sales. Es importante

especificar que la lámina de lavado va en función del monitoreo previo del campo, pero por lo general están en torno entre el 20 y 30% de una lámina superior al riego normal (en algunos casos puede llegar a un adicional del 50% de la lámina de riego).

Figura 24

Monitoreo inicial de conductividad eléctrica ($dS m^{-1}$) mediante calicatas en paltos

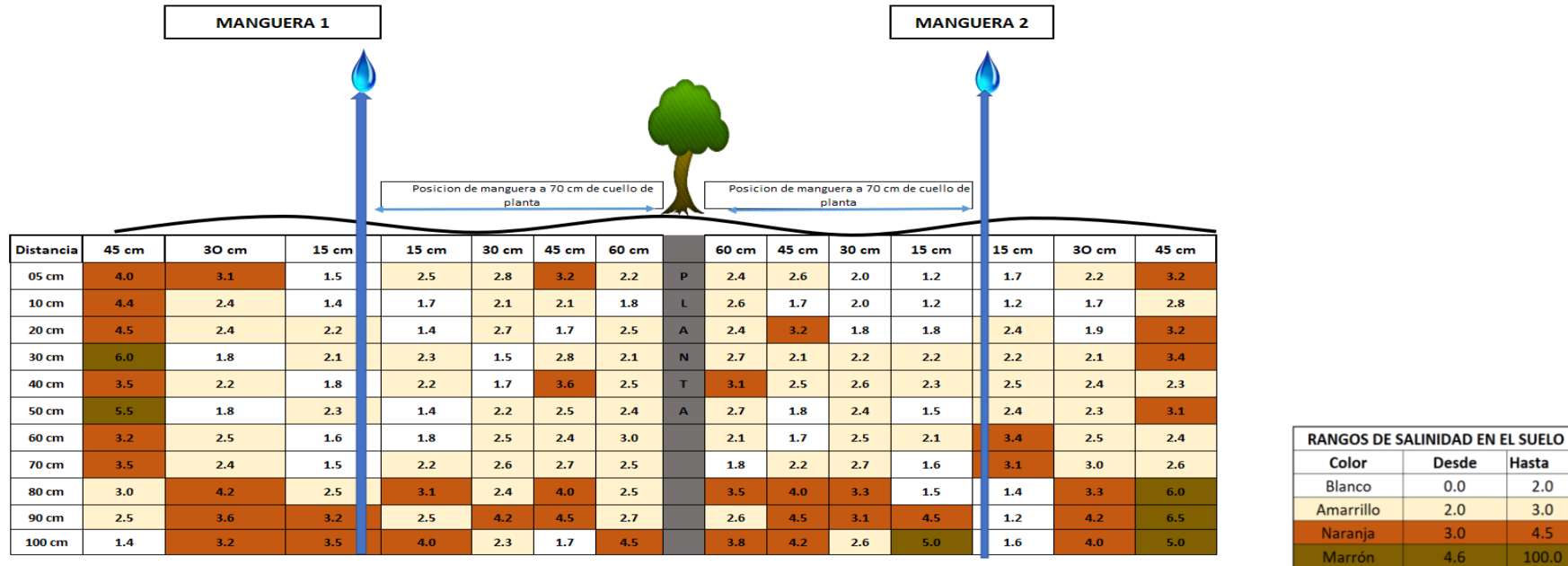


RANGOS DE SALINIDAD EN EL SUELO		
Color	Desde	Hasta
Blanco	0.0	2.0
Amarrillo	2.0	3.0
Naranja	3.0	4.5
Marrón	4.6	100.0

Nota: Corresponde a un suelo salino de textura franco arenosa, no compactado y con buen drenaje. La medición de conductividad eléctrica se realizó con una sonda portátil de capacitancia FDR (ProCheck, marca: decagon devices).

Figura 25

Monitoreo de conductividad eléctrica ($dS m^{-1}$) mediante calicatas en paltos después de 3 meses con riegos de lavado de sales



Nota: Corresponde a un suelo salino de textura franco arenosa, no compactado y con buen drenaje. La medición de conductividad eléctrica se realizó con una sonda portátil de capacitancia FDR (ProCheck, marca: decagon devices), después de 24 horas de haber realizado su último riego de lavado.

Si no se hace ningún manejo agronómico que favorezca la reducción de sales en el suelo se puede generar situaciones donde se tenga niveles superiores de 2.0 dS m^{-1} de conductividad eléctrica y niveles de cloruros solubles (en solución suelo) por encima de 3.0 mEq L^{-1} . Cuando esto ocurre, es común observar las puntas y bordes de las hojas quemadas y corresponde a la sintomatología típica de fitotoxicidad que es causada por exceso de cloruros, lo que repercute en una reducción del área fotosintética y en una merma en el rendimiento del cultivo.

En la Figura 26 se muestra los síntomas de toxicidad de hojas de paltos por exceso de cloruros con valores de 1800 ppm (0.18%) a nivel foliar.

Figura 26

Síntomas de toxicidad de hojas de paltos por exceso de cloruros a nivel foliar



5.4 Calibración y mantención preventiva del sistema de riego por goteo

Se implementó un protocolo de calibración y mantención preventiva del sistema de riego por goteo que involucra las siguientes estrategias:

- a. Descoles a alta presión y apertura de desfogues de submatrices (frecuencia quincenal).
- b. Medición de presión a inicios de manguera (frecuencia mensual a bimestral).

- c. Medición y calibración de presiones de válvulas de riego (frecuencia mensual).
- d. Medición de coeficiente de uniformidad (frecuencia bimestral).
- e. Limpieza de filtros de caseta de fertirriego (frecuencia diaria).
- f. Medición de presión en filtrado (frecuencia diaria).
- g. Revisión del tablero eléctrico (frecuencia diaria).
- h. Limpieza de mangueras mediante inyección de ácidos, debido a obturamientos químicos (frecuencia en base a monitoreos).
- i. Limpieza de mangueras mediante inyección de peróxido de hidrógeno o hipoclorito, debido a obturamientos biológicos (frecuencia en base a monitoreos).

Estas prácticas permitieron que se logre mejorar los coeficientes de uniformidad del sistema de riego (CU) a valores entre 85 - 95%. Anteriormente, los CU se encontraban entre 65 - 80%, con casos extremos de 50% (Tabla 25). Adicionalmente, en casi la mitad de los casos se tuvo que cambiar mangueras de riego debido a que en su mayoría no habían recibido mantenimiento y además tenían por encima de los 10 años de antigüedad con fuertes obturamientos de goteros.

Tabla 25

Comparativo entre los antecedentes y valores actuales de coeficiente de uniformidad de riego (CU) en base a valores promedios

Variable	Unidades	Antecedentes	Valores actuales
CU	%	65 – 80	85 – 95

5.5 Relación entre el rendimiento y las estrategias de manejo de las propiedades físicas del suelo

El rendimiento del palto mejoró mucho en los últimos años, partiendo con rendimientos históricos entre 8.0 - 10.0 t ha⁻¹ (entre los años 2015 y 2017) y aumentando en los siguientes años de la siguiente manera: 14.6 t ha⁻¹ en el año 2018, en el 2019 a 17.3 t ha⁻¹, en el 2020 a 18.5 t ha⁻¹ y finalmente, en el 2021 y 2022, se alcanzó 20.1 y 25.0 t ha⁻¹, respectivamente (alcanzándose sectores con 35.0 t ha⁻¹).

Tal como se muestra en la Tabla 24, luego de ejecutar las estrategias de manejo de suelo (referido a un suelo de textura franca), se logró reducir la densidad aparente del suelo a valores de $1.36 - 1.50 \text{ g mL}^{-1}$ (inicialmente en $1.50 - 1.62 \text{ g mL}^{-1}$) y aumentar la porosidad total a valores de $43.7 - 47.9\%$ (calculada como $f_t = 1 - p_b/p_s$; inicialmente estaba en $38.9 - 43.3\%$). También se calculó la porosidad total mediante el modelo predictivo SPAW, obteniéndose valores entre $44.2 - 48.3\%$ (inicialmente estaba entre $37 - 42.3\%$), aumentó también la macroporosidad (según valores hallados en el ejercicio de riego, se obtuvo 20.1% de macroporosidad y antes se encontraba en 14.6%). Estos cambios en las propiedades físicas del suelo coinciden con lo reportado por Kozlowski (1985), quien advierte que la compactación del suelo resulta en un decrecimiento en el número y tamaño de macroporos (poros mayores a 50 micras) y un decrecimiento en la porosidad total. Los poros inicialmente afectados por compactación son aquellos poros grandes ($50 - 150$ micras). Asimismo, el autor también señala que en situaciones de compactación de suelo, existe un incremento en la cantidad de microporos, mientras que por su parte Casanova y Lobo (2007), en base al estudio de suelos compactados en La Vela (estado Portuguesa, Venezuela), concluyeron que inicialmente los microporos aumentan, pero cuando el suelo está fuertemente compactado, disminuyen (su estudio estaba relacionado a un punto de inflexión a partir del cual disminuyen los microporos, correspondiente a una densidad aparente de 1.45 g mL^{-1}). Este comportamiento guarda relación con lo documentado por Dewhurst et al. (1998), quien refiere que, ante un evento de compactación del suelo, los poros de mayores dimensiones son los primeros en colapsar (reducción de su tamaño) y ante este colapso progresivo de poros de mayor dimensión que da lugar a niveles de compactación cada vez mayores, luego continúa el colapso de los poros de menor tamaño. Sumado a ello, Letey (1985) menciona que la densidad aparente y la distribución del tamaño de poros afecta la relación entre el agua del suelo con la aireación y la resistencia mecánica del suelo. Por ejemplo: si incrementa el contenido de humedad del suelo, decrece la aireación (efecto indeseable), pero decrece también la resistencia mecánica (efecto deseable). Este efecto del agua en ambos parámetros se intensifica cuando aumenta la densidad aparente y/o hay presencia de pequeños poros en el suelo (los suelos pobremente estructurados, suelen tener alta densidad aparente).

Reynolds et al. (2009) clasifica a los poros del suelo en 2 tipos: estructurales y texturales, siendo los primeros de mayor tamaño porque comprenden una red tridimensional de micro-fisuras, fracturas y espacios inter-agregados (por ejemplo: estructura secundaria) creados por la labranza, eventos de congelamiento y descongelamiento, uso de enmiendas al suelo, rotación de cultivos, drenaje, desarrollo radicular, actividad biológica, etc. En muchos casos los poros estructurales determinan la forma de la curva de retención de humedad entre saturación y el punto de inflexión de la curva. Por otro lado, los poros texturales incluyen los espacios dentro de los agregados y entre las partículas individuales de arena, limo, arcilla y materia orgánica (por ejemplo: estructura primaria) y controlan de sobremanera la liberación de humedad en tensiones mayores al punto de inflexión. Asimismo, para Rabot et al. (2017), los poros que resultan del arreglo de las partículas primarias del suelo son denominados poros texturales y los poros más grandes que resultan de la actividad biológica, el clima y de las prácticas de manejo, se denominan poros estructurales. Richard et al. (2001) precisan que los poros texturales se originan debido al arreglo de las partículas elementales del suelo, son poros lacunares que resultan del empaquetamiento de las partículas de arena y limo con la fase arcillosa y poros arcillosos que resultan del empaquetamiento de las partículas de arcilla dentro de la fase arcillosa, donde la estabilidad de los poros texturales se ha visto sobre todo en suelos limosos, arcillo-limosos o limosos-arcillosos, incluso con altos contenidos de humedad y alta compactación, pero no significa que no ocurra variaciones. Si bien es cierto que, ante un evento de compactación del suelo, los poros estructurales son los primeros en reducir su diámetro, no significa que si la fuerza de compactación sigue en aumento los poros texturales no van a reducir su diámetro, lo que ocurrirá es que, pese a su mayor estabilidad, la relación poros estructurales/poros texturales cambiará y finalmente con esta información se podrá predecir el comportamiento de las propiedades hidráulicas de cada tipo de suelo en particular.

En la Tabla 24 también se muestra que disminuyó la resistencia mecánica a la penetración a valores de 0.4 – 0.9 MPa (inicialmente entre 2.2 – 2.8 MPa), aumentó la conductividad hidráulica a 1.7 – 2.8 cm h⁻¹ (inicialmente entre 0.6 – 1.4 cm h⁻¹) y aumentó la profundidad efectiva de raíces a valores de 0.7 – 1.0 m (inicialmente entre 0.54 – 0.72 m.), coincidiendo con lo reportado por Allen et al. (1998) respecto a la capacidad de exploración de las raíces del palto. El crecimiento radical requiere, además de una adecuada relación suelo-aire en el suelo, también de una baja resistencia mecánica y mantener estos equilibrios es mucho más compleja en suelos de texturas finas, mal estructurados y/o compactados (Sellés et al., 2012). Cabe señalar que, Casanova y Lobo (2007) reportaron que en los suelos compactados estudiados en

Turén (estado Portuguesa, Venezuela) sufrieron reducciones de densidad aparente, pasaron de valores iniciales de 1.7 g mL^{-1} a valores finales de 1.3 g mL^{-1} luego de realizar prácticas de post-subsolado. Los valores limitantes de resistencia a la penetración dependen de las condiciones del suelo, en términos de humedad y densidad del suelo. La variación de la humedad determina los valores de densidad del suelo donde la resistencia a la penetración alcanza valores superiores a los críticos de 2.0 MPa (para la mayoría de cultivos), pero la variabilidad espacial de la densidad del suelo a lo largo de su secado, permite una amplia variación de la resistencia a la penetración (Hitoshi et al., 2000). Los valores de resistencia mecánica de suelo que empiezan a limitar el desarrollo de las raíces en paltos se encuentran a partir de 1.0 MPa y sobre los 2.0 MPa, donde la limitación es fuerte (R. Ferreyra, comunicación personal, 07 de setiembre de 2022).

Los suelos compactados, en condiciones de alta humedad, inducen deficiencias en el suministro de oxígeno a las raíces, limitando la absorción de agua y de nutrientes, así como la productividad y calidad de los cultivos (Hitoshi et al., 2000). Kozłowski (1985) menciona que, en suelos compactados, el consumo reducido de agua se debe también al efecto producido por las altas concentraciones de CO_2 en reducir la permeabilidad de las raíces, donde una disminución de macroporos limita la difusión de O_2 en el suelo y reduce la difusión de CO_2 fuera del suelo. Por otro lado, es pertinente mencionar que, no siempre la compactación es mala, Oliveira et al. (2004) encontró en los Latosoles más intemperizados en Brasil con baja capacidad de almacenamiento de agua, que la compactación del suelo podría ser beneficiosa en términos de retención de humedad, debido a la transformación de una parte de los macroporos a microporos, aunque claramente esta es una realidad muy distinta al valle de Chincha.

Sellés et al. (2012) añaden que la interrelación agua-aireación es opuesta a la interrelación agua-resistencia mecánica en sus efectos sobre la planta, es decir, al incrementarse el contenido de humedad, disminuye la resistencia mecánica del suelo al crecimiento radical (efecto deseable), pero simultáneamente puede reducirse la aireación y llegar a un cuadro de asfixia radical, lo cual es un efecto indeseable

En las últimas dos décadas se habla mucho de mejorar la calidad física de los suelos y respecto a este punto, Reynolds et al. (2002) indican que desde la perspectiva agrícola, un suelo de buena calidad física es aquel que es suficientemente “fuerte” para mantener una buena estructura, permitir el correcto desarrollo de los cultivos y tolerar condiciones de erosión y compactación, pero lo suficientemente “débil” para permitir sin restricciones el crecimiento de las raíces y la

proliferación flora y fauna y todo esto sin olvidar el equilibrio entre la transmisión de fluidos y las características de almacenamiento que permitan mantener las proporciones adecuadas de agua, aire y elementos solubles, estas cantidades adecuadas permitirán maximizar el rendimiento de los cultivos y minimizar la degradación ambiental.

Lal (2020b, 2020c) sostiene que la forma de preservar y proteger los suelos parte es de nuestra conexión con ellos. El objetivo es producir alimentos sin desgastar el suelo y afirma que “recuperar un centímetro de suelo puede tardar miles de años y podemos destruirlo en una tormenta” y plantea que existen principios básicos para la gestión de suelos:

1. Llevar a cabo la ley del retorno: reemplazar aquello que se retira.
2. Tener siempre el suelo cubierto con una capa de biomasa y vegetación viva. Puede ser una leguminosa que fija nitrógeno de la atmósfera y libera ciertos nutrientes del subsuelo sobre la superficie.
3. Incrementar los mecanismos de reciclaje. Tomar por ejemplo los restos de cosecha y la biomasa que no se usa, y se le devuelve al suelo. También se puede depositar compost de material orgánico reciclado.
4. Reducir en lo posible los riesgos de erosión del suelo como consecuencia del agua, viento, labranza, gravedad, etc.
5. Aumentar la actividad y la diversidad de las especies de la biota del suelo.
6. Tratar de evitar la alteración mecánica del suelo.
7. Utilizar los sistemas integrados de nutrientes, reduciendo el uso de fertilizantes químicos.
8. Disminuir la quema de los residuos de cosechas.
9. Mantener la salud de los suelos.
10. Crear un presupuesto positivo de carbono en el suelo y en el ecosistema.

Finalmente, es importante resaltar que Lal (2020a) indicó que la salud física del suelo es esencial para mejorar la eficiencia del riego y la de los fertilizantes, ya que solo el 30 % o menos del agua de riego y los fertilizantes aplicados en suelos agotados llegan a los cultivos, por lo que el autor enfatiza que se necesita una agricultura que restaure la salud de los suelos, dado que la productividad puede incrementarse con una agricultura más amigable. Además, sugiere que se debe cerrar la brecha del rendimiento con una mejor agricultura que priorice la salud de los suelos y permita producir “más con menos”.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

1. El subsolado post-plantación (“entre hileras” y “entre plantas”), la incorporación de materia orgánica y “mulching”, las prácticas de riego (que tienen en consideración el balance agua/oxígeno), los riegos con fracciones de lavado (FL) y el control del tránsito de la maquinaria agrícola fueron las estrategias agronómicas aplicadas que influenciaron positivamente en la recuperación de los huertos de palto en estado de decaimiento de la Corporación Frutícola de Chincha S.A.C., partiendo de productividades históricas de 8 a 10 t ha⁻¹ hasta alcanzar las 25.0 t ha⁻¹ en el año 2022 (con sectores de 35.0 t ha⁻¹). Además, su impacto se vio reflejado en las importantes mejoras de las propiedades físicas del suelo, permitiendo así reconciliar dos elementos aparentemente opuestos: la necesidad de mejorar la calidad física del suelo con influencia directa sobre el incremento de la productividad del huerto y la necesidad imperativa de mantener la calidad del suelo, minimizando su degradación e incluyendo estrategias de sostenibilidad).
2. Las principales causas para el decaimiento de un huerto de palto son las siguientes: desbalances hídricos, déficit de oxígeno en el suelo, compactación de suelos, falta de nutrientes, salinidad, condiciones climáticas adversas, entre otros; siendo el desbalance hídrico, asociado a suelos con condiciones limitantes, el factor que más influye en la baja productividad. Los principales síntomas de un huerto de palto en estado de decaimiento son: escasas raíces, hojas angostas de color verde amarillento e inclinadas hacia el suelo, alto aborto floral, caída abundante de frutos (a fines de primavera y/o finales de verano), defoliación de brotes de la temporada, golpe de sol en la fruta, árboles defoliados con exceso de floración, fruta de bajo calibre, árboles con puntas quemadas, bajos rendimientos productivos, aumento de desórdenes fisiológicos y mayor incidencia de *Lasiodyplodia theobromae* y *Phytophthora cinnamomi*.

3. Las prácticas que implicaron el aporte de materia orgánica al suelo, se correlacionaron positivamente con la capacidad de estructuración del suelo, lo que se ve expresado en la mejora de la porosidad del suelo, distribución de poros, densidad aparente, aireación, capacidad de retención de humedad, entre otros; contribuyendo a mejorar la calidad física del suelo y su conservación.
4. Ante un evento de compactación del suelo, los poros de mayores dimensiones son los primeros en colapsar (reducción de su tamaño) y ante este colapso progresivo de poros de mayor dimensión (que dará lugar a niveles de compactación cada vez mayores), luego continuará el colapso de los poros de menor tamaño.
5. Mejorando la capacidad de aire del suelo a 20% y manteniendo las demás propiedades físicas dentro de los parámetros adecuados, se aprecia que para el valle de Chíncha es suficiente para poder alcanzar el potencial productivo del palto.
6. Los valores de resistencia mecánica del suelo, que empiezan a limitar el desarrollo de las raíces en paltos, se encuentran a partir de 1.0 MPa y ya sobre 2.0 MPa su limitación es fuerte.

6.2 Recomendaciones

1. Realizar curvas de retención de humedad del suelo. Conocer el porcentaje de poros capaces de permitir el flujo de aire a través del suelo y conocer aquellos poros que almacenan agua disponible y no disponible para la planta.
2. No cometer errores en el riego. Si se riega en exceso, se reduce la aireación del suelo (se corre el riesgo de generar asfixia radicular). Por otro lado, ante un déficit hídrico, se aumenta la resistencia mecánica del suelo (se corre el riesgo de generar compactación, salinización, etc.).
3. Antes de ejecutar programas de manejo agronómico, partir por analizar las distintas propiedades del suelo y sus posibles interacciones, con el objetivo de poder predecir futuros comportamientos (a favor y en contra del cultivo).

4. No perder de vista la etapa de control de la programación del riego y utilizar la tecnología disponible como complemento a las calicatas. En campo se trabaja con unidades de producción muy desuniformes entre sí; por lo tanto, se recomienda promover un manejo más sitio-específico.
5. Buscar mejorar la productividad de los huertos sin perder de vista el enfoque de la calidad del suelo, minimizando su degradación e incluyendo estrategias de sostenibilidad.
6. Promover un manejo que integre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo para mejorar su salud.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGQ Labs. (2019). *Interpretación de análisis de suelo, agua y foliares*. Cursos de capacitación para Corporación Frutícola de Chincha S.A.C. (FRUCHINCHA).
- Armstrong, W., Justin, S., Beckett, P. y Lythe, S. (1990). Root adaptation to soil waterlogging. *Aquatic Botany*, volumen 39, 57-73. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/030437709190022W>
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. (1998). *Irrigation and drainage*. Paper N° 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Ayers, R. y Westcot, D. (1976). *Water quality for agriculture*. Paper N° 29. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Barrientos, A. (2017). *Presente y futuro de los portainjertos y variedades de aguacate en el mundo y México*. Memorias del V Congreso Latinoamericano del Aguacate. Ciudad Guzmán, Jalisco, México.
- Cautín, R. (30 de setiembre 2019). Estrategias para el manejo de copa en palto. *Revista especializada Red Agrícola*. Recuperado de <https://www.redagricola.com/cl/estrategias-para-el-manejo-de-copa-en-palto/>
- Casanova, E. y Lobo, D. (2007). Relación entre la física y la fertilidad de los suelos. *Venesuelos*, 15, 42-56. Recuperado de http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/issue/view/141
- Dewhurst, D., Aplin, A., Sarda, J. y Yang, Y. (1998). Compaction-driven evolution of porosity and permeability in natural mudstones: An experimental study. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B1), 651-661. <https://doi.org/10.1029/97JB02540>
- Ferreya, R. (2021). *Características del suelo relacionadas con el riego*. Curso internacional de paltos organizado por Red Agrícola.
- Ferreya, R. y Sellés, G. (2007). Manejo del riego y suelo en palto. Boletín 160. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), La Cruz, Chile.

- Ferreya, R. y Sellés, G. (2013). *Manual de riego para especies frutales. Uso eficiente del agua de riego y estrategias para enfrentar períodos de escasez*. Boletín 278. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), La Cruz, Chile.
- Ferreya, R., Sellés, G., Ferreya, R., Gil, P. y Ruíz, R. (2011). *Asfixia radicular en huertos de paltos: manejo del riego y suelo*. Boletín 231. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), La Cruz, Chile.
- Ferreya, R., Sellés, G., Ruíz, R., Gil, P. y Barrera, C. (2008). *Manejo de la clorosis férrica en palto*. Boletín 181. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), La Cruz, Chile.
- Gabriels, D., Lobo D. y Pulido M. (2006). Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos. *Venesuelos* 14, 7-22. Recuperado de <http://saber.ucv.ve/handle/10872/4158>
- Gardiazabal, F. (2008). *Palto y cítricos: generalidades del cultivo*. Producciones Graficas Ltda. Colección Libros INIA. Quillota, Chile.
- Gardiazabal, F. (21 de abril de 2017). En la búsqueda de una variedad tipo Hass pero mejor que Hass. *Revista especializada Red Agrícola*. Recuperado de <https://www.redagricola.com/pe/la-busqueda-una-variedad-tipo-hass-mejor-hass/>
- Gardiazabal, F. (18 de abril 2022). ¿Cuáles son las variedades de palto más resistentes al frío?. *Revista especializada Red Agrícola*. Recuperado de <https://www.redagricola.com/cl/cuales-son-las-variedades-de-palto-mas-resistentes-al-frio/>
- Gil, P., Bonomelli, C., Schaffer B., Ferreya, R. y Getina, C. (2012). Effect of soil water-to-air ratio on biomass and mineral nutrition of avocado trees. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12 (3), 609-630. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162012005000020>
- González-Barrios, J., González-Cervantes, G., Sánchez-Cohen, I., López-Santos, A. y Valenzuela-Núñez, L. (2011). Caracterización de la porosidad edáfica como indicador de la calidad física del suelo. *Terra Latinoamericana*, 29(4), 369-377. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792011000400369&lng=es&tlng=es.
- Havlin, J., Tisdale, S., Nelson, W. y Beaton, J. (2017). *Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management*. Pearson India Education Services Pvt. Ltd.

- Hillel, D. (2003). Introduction to environmental soil physics. *Academic Press*.
- Hitoshi, S., Tormena, C., Araujo, M., Andrade, A., Pires, A., Pintro, J., Saraiva, A. y Vidigal, P. (2000). Resistência do solo à penetração e porosidade de aeração de um latossolo vermelho distrófico sob plantio direto por dois anos. *Acta Scientiarum*, 22(4). 1055-1060. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v22i0.2847>
- Kozlowski, T. (1985). Soil aeration, flooding, and tree growth. *Journal of arboriculture*, 11(3), 85-96. <https://doi.org/10.1080/02827588609382405>
- Lal, R. (25 de julio de 2020a). *La naturaleza ofrece soluciones a nuestros problemas, incluso al COVID 19*. Infobae. Recuperado de <https://www.infobae.com/americamundo/2020/07/25/rattan-lal-ganador-del-nobel-de-la-agricultura-la-naturaleza-ofrece-soluciones-a-nuestros-problemas-incluso-al-covid-19/?outputType=amp-type>
- Lal, R. (1 de diciembre 2020b). *Los suelos también deberían tener derechos*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Recuperado de <https://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1331831/>
- Lal, R. (2 de diciembre 2020c). *Rattan Lal y el IICA lanzan la iniciativa “suelos vivos de las Américas”*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Recuperado de <https://iica.int/es/prensa/noticias/rattan-lal-y-el-iica-lanzan-la-iniciativa-suelos-vivos-de-las-americas>.
- Lal, R. (5 de enero de 2022). *Agro de América Latina requiere cambiar paradigmas*. Agricultura de las Américas. Recuperado de <https://agriculturadelasamericas.com/agricultura/agro-de-america-latina-requiere-cambiar-paradigmas/>
- Lal, R. y Shukla, M. (2004). *Principles of soil physics*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Lemus, G., Ferreyra, R., Gil, P., Sepúlveda, P., Maldonado, P., Toledo, C., Barrera, C. y Celedón, J. (2010). *El cultivo del palto*. Boletín INIA N° 129. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, Chile.
- Letey, J. (1985). Relationship between soil physical properties and crop production. Department of Soil and Environmental Sciences. University of California- Riverside. Recuperado de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4612-5046-3_8

- Lobo, D. y Pulido, M. (2006). Métodos e índices para evaluar la estabilidad estructural de los suelos. *Venesuelos*, 14, 22-37. Recuperado de http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/issue/view/140
- Loli, O. (2012). *Análisis de suelo y fertilización en el cultivo del cacao*. Guía técnica. UNALM y AGROBANCO. Recuperado de <https://www.agrobanco.com.pe/data/uploads/ctecnica/010-b-cacao.pdf>
- Loli, O. (2013). *El suelo en la nutrición de las plantas*. Guía Técnica. Programa de especialización: fisiología y nutrición vegetal en cultivos de agroexportación. Universidad Nacional Agraria La Molina e Instituto Valle Grande.
- Loli, O. (2022). *Propiedades físicas del suelo*. Curso de capacitación de la empresa Molinos & CIA.
- Namesny, A., Conesa, C., Hormaza, I. y Lobo, G. (2020). *Cultivo, poscosecha y procesado del aguacate*. SPE3, Valencia, España.
- Oliveira, G., Días, M., Resck, D. y Curi, N. (2004). Caracterização química e físico-hídrica de um latossolo vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28(2), 327-333. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000200011>
- Palma, J. (2021). *Nutrición en Palto*. Curso Intensivo de la empresa SQM VITAS.
- Pla, I. (2014). Nuevas experiencias en la evaluación y diagnóstico de procesos de salinización y sodificación de suelos en América Latina. *Suelos Ecuatoriales*, 44(2), 125-137. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7831480>
- Portal Frutícola. (04 de diciembre del 2016). Guía técnica para producción del aguacate o palto. *Portal Frutícola*. Recuperado de <https://www.portalfruticola.com/noticias/2016/12/04/guia-tecnica-para-produccion-del-aguacate-o-palto/>
- ProHass. (setiembre del 2022). *Industria de la palta sigue en ascenso*. ProHass. Recuperado de <https://prohass.com.pe/2022/07/18/industria-de-la-palta-sigue-en-ascenso/>
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S. y Vogel, H. (2017). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma* 314, 122-137. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706117310273>

- Reynolds, W., Bowman, B., Drury, C., Tan, C. y Lu, X. (2002). Indicators of Good soils Physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, 110, 131 – 146. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00228-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00228-8)
- Reynolds, W., Drury, C., Tan, C., Fox, C. y Yang, X. (2009). Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152, 252–263. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009>
- Richard, G. Cousin, I., Sillón, J., Bruand, A. y Guérif, J. (2001). Effect of the compaction of the porosity of a silty soil: influence on insaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 52(1), 49-58. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00357.x>
- Saxton, K. (2017). Soil - Plant - Atmosphere - Water Field & Pond Hydrology. USDA Agricultural Research Service. Recuperado de <https://data.nal.usda.gov/dataset/soil-plant-atmosphere-water-field-pond-hydrology>
- Saxton, K. y Willey, P. (2005). The SPAW Model for Agricultural Field and Pond Hydrologic Simulation. En V. Singh y D. Frevert, *Mathematical Modeling of Watershed Hydrology*, Chapter 17, 1-37. CRC Press LLC. Recuperado de <https://hrsl.ba.ars.usda.gov/SPAW/SPAW%20Book%20Chapter.pdf>
- Saxton, K., Willey, P. y Rawls, W. (2006). Field and pond hydrologic analyses with the SPAW MODEL. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 062108. <https://doi.org/10.13031/2013.20709>
- Schaffer, B. (2006). *Effects of soil oxygen deficiency on avocado (Persea americana Mill) trees*. Seminario Internacional: Manejo del Riego y Suelo en el Cultivo del Palto La Cruz, Chile.
- Schaffer, B., Andersen, P. y Ploetz, R. (1992). Responses of fruit trees to flooding. *Horticultural reviews*, 13, 257-313.
- Schaffer, B., Wolstenholme, B. y Whiley, A. (Ed.). (2013). *The avocado, botany, production, and uses*. 2nd edition. Oxon UK. 416: CABI Publishing.
- Sellés, G., Ferreyra, R., Ruíz, R. y Ahumada, R. (2012). *Compactación de suelos y su control: Estudio de casos en el valle de Aconcagua*. Boletín INIA N° 234. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, Chile.

Soil Science Division Staff. (2017). *Soil survey manual: Handbook 18*. Government Printing Office. USDA.

Téliz, D. y Mora, A. (2019). *El aguacate y su manejo integrado*. 2da reimpresión. México. Editorial del colegio de Postgraduados. Universidad Autónoma Chapingo.

Tormena, C., Silva, A. y Libardi, P. (1998). Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 22, 573-581. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000400002>

Tormena, C., Barbosa, M., Saraiva, A. y Andrade, A. (2002). Densidades, porosidades e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. *Scientia Agricola*, 59 (4), 795-801. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162002000400026>