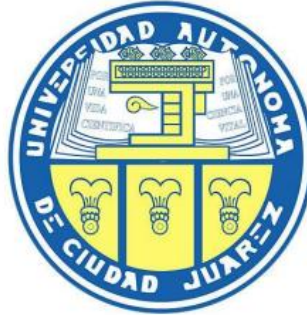


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

INSTITUTO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y MANUFACTURA



**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA DE PRODUCCIÓN ESBELTA PARA
MAXIMIZAR EL RENDIMIENTO DE MAÍZ MEDIANTE LA OPTIMIZACIÓN
DE PROCESOS Y EL MANEJO EFICIENTE DE SUELOS.**

PROYECTO DE INGENIERÍA QUE PRESENTA

DIEGO AGUIRRE RUIZ

COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

DIRECTOR:

DR. MANUEL ROMÁN PINA MONARREZ

Co-DIRECTOR:

DR. LUIS ALBERTO RODRIGUEZ PICON

CD. JUÁREZ, CHIH.

MAYO 2026

DEDICATORIA

A Dios, que sin su voluntad nada fuera posible.

A mis padres, y hermano por su apoyo, en especial a mi abuelo Gustavo Ruiz. El que con su ejemplo me enseñó el valor del trabajo y la pasión por el campo.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis, el Dr. Manuel Román Piña Monárrez, le agradezco no solo su compromiso y apoyo, sino también la paciencia y la sabiduría con las que supo guiarme. Su ejemplo y dedicación a la docencia ha sido una inspiración, a seguir preparándome y a aspirar, cada día, a ser un mejor académico.

RESUMEN

En México, la producción de maíz enfrenta una brecha productiva significativa, con un rendimiento promedio nacional de 3.64 toneladas por hectárea (t/ha), muy por debajo del potencial técnicamente alcanzable y de los rendimientos de países como Estados Unidos (10.7 t/ha). Esta situación genera dependencia de importaciones y afecta la soberanía alimentaria, particularmente en regiones como Chihuahua, donde prácticas agronómicas desactualizadas, fertilización sin diagnóstico de suelo, escasa tecnificación y efectos del cambio climático limitan la productividad.

Frente a este diagnóstico, el presente proyecto de maestría tuvo como objetivo diseñar una metodología de producción esbelta basada en principios de ingeniería industrial y agricultura de precisión, orientada a maximizar el rendimiento del maíz mediante la optimización de insumos, la estandarización de procesos y el manejo eficiente del suelo. El estudio se centró en un predio de referencia en Las Cruces, Namiquipa, Chihuahua, con una meta de rendimiento de 12 t/ha. Dado que la validación en campo se realizará en un ciclo posterior a la entrega del trabajo, la investigación es de carácter teórico.

La metodología se estructuró en 17 pasos agrupados en cuatro fases: planificación y diagnóstico, preparación y siembra, manejo fenológico crítico, y cosecha con mejora continua. Incluye la determinación de la fecha óptima de siembra mediante análisis probabilístico de series históricas (1997-2024), la selección del híbrido ASGROW RX-860 (ciclo 115-120 días, tolerancia a 78,000 semillas/ha), la corrección del suelo (pH 5.7, materia orgánica baja, desbalance calcio-magnesio) mediante encalado y enmiendas orgánicas, y un plan de nutrición fraccionada por etapa fenológica basado en coeficientes de extracción por tonelada de grano. Asimismo, se desarrollaron protocolos para tratamiento e inoculación de semilla (químicos y microorganismos benéficos), manejo de residuos postcosecha y siembra de precisión.

Los resultados del diseño metodológico permiten establecer una hoja de ruta técnica para alcanzar 12 t/ha en condiciones controladas. Se concluye que la integración

de principios de manufactura esbelta con conocimientos agronómicos actualizados constituye una innovación para el sector agrícola mexicano. Se recomienda la validación en campo durante el ciclo 2026 y la transferencia de la metodología a pequeños productores mediante versiones simplificadas.

Palabras clave: maíz, manufactura esbelta, agricultura de precisión, rendimiento, fertilización fraccionada, confiabilidad.

ABSTRACT

In Mexico, maize production faces a significant yield gap, with a national average yield of 3.64 tons per hectare (t/ha), far below the technically achievable potential and the yields of countries such as the United States (10.7 t/ha). This situation creates import dependency and affects food sovereignty, particularly in regions like Chihuahua, where outdated agronomic practices, fertilization without soil diagnosis, low technological adoption, and climate change effects limit productivity.

In response to this diagnosis, this master's project aimed to design a lean production methodology based on industrial engineering and precision agriculture principles, oriented to maximize maize yield through input optimization, process standardization, and efficient soil management. The study focused on a reference field in Las Cruces, Namiquipa, Chihuahua, with a yield target of 12 t/ha. Since field validation will be carried out in a subsequent cycle after thesis submission, the research is theoretical in nature.

The methodology was structured into 17 steps grouped into four phases: planning and diagnosis, preparation and sowing, critical phenological management, and harvest with continuous improvement. It includes determination of the optimal sowing date through probabilistic analysis of historical series (1997-2024), selection of the ASGROW RX-860 hybrid (115-120 day cycle, tolerance to 78,000 seeds/ha), soil correction (pH 5.7, low organic matter, calcium-magnesium imbalance) through liming and organic amendments, and a phased nutrition plan based on extraction coefficients per ton of grain. Protocols for seed treatment and inoculation (chemicals and beneficial microorganisms), post-harvest residue management, and precision sowing were also developed

The methodological design results provide a technical roadmap to achieve 12 t/ha under controlled conditions. It is concluded that integrating lean manufacturing principles

with updated agronomic knowledge represents an innovation for the Mexican agricultural sector. Field validation during the 2026 cycle and transfer of the methodology to small producers through simplified versions are recommended.

Keywords: maize, lean manufacturing, precision agriculture, yield, split fertilization, reliability.

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS.....	XIII
LISTA DE FIGURAS.....	XIV
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes del Problema.....	2
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	5
2.1. Declaración de problema	5
2.2. Descripción del problema.	5
2.3. Justificación	7
2.4. Hipótesis.....	8
2.4.1. Hipótesis general.....	8
2.4.2. Hipótesis Específicas.	8
2.5. Objetivos	9
2.5.1. Objetivos General.....	9
2.5.2. Específicos	9
2.5.3. Supuestos	10
2.6. Alcances y Limitaciones	11
2.6.1. Alcances	11
2.6.2. Limitaciones.....	11
3. MARCO TEÓRICO.....	13
3.1. Maíz y sus Variables	13
3.1.1. Etapas fenológicas del maíz.....	14
3.2. pH del Suelo.....	17
3.3. Tipos de Tierras	26
3.4. Requerimientos Nutrimientales del Maíz.....	44
3.5. Microorganismos del Suelo	48

3.6. Capacidad de Intercambio Catiónico	54
4. METODOLOGÍA	59
4.1. Materiales Utilizados	59
4.1.1. Materiales agronómicos	59
4.1.2. Materiales de información y datos	59
4.1.3. Materiales tecnológicos y herramientas analíticas	60
4.1.4. Materiales metodológicos y de ingeniería industrial	60
4.2. Descripción de la Metodología	60
4.2.1. Descripción general de la metodología	62
4.2.2. Desarrollo detallado del proceso	63
5. RESULTADOS	66
5.1. Fase 1: Planificación y Diagnóstico (Pasos 1-5).....	66
5.1.1. Definir metas de rendimiento y rentabilidad.....	66
5.1.2. Plan de siembra	66
5.1.3. Fecha de siembra.....	68
5.1.4. Recopilación y Análisis de Datos	69
5.1.5. Selección de semilla.....	78
5.1.6. Distribución de población	82
5.1.7. Análisis de suelo	84
5.1.8. Plan de corrección de suelo.....	86
5.1.9. Labranza del suelo.....	88
5.1.10. Diseño de nutrición integral.....	88
5.2. Fase 2: Preparación y Siembra (Pasos 6-10).....	94
5.2.1. Selección y tratamiento de semilla.....	94
5.2.2. Preparación de maquinaria.....	95
5.2.3. Manejo de residuos postcosecha	96
5.2.4. Inoculación de la semilla.....	98
5.2.5. Siembra de precisión	99
5.3. Fase 3: Manejo Fenológico Crítico (Pasos 12-14).....	100
5.4. Fase 4: Cosecha y Mejora Continua (Pasos 15-17)	103

5.4.1. Preparación y cosecha de calidad.....	103
5.4.2. Análisis económico y agronómico	103
5.4.3. Actualización de metas y reinicio	104
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	104
6.1. Conclusiones	104
6.2. Recomendaciones.....	106
1. REFERENCIAS	108

LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1.1 Registro de la primer y última fecha de temperatura menor a 10 grados.	70
Tabla 5.1.2 Fecha optima de siembra expresada en días calendarios	71
Tabla 5.1.3 CDF como probabilidad de que la última helada haya ocurrido.....	73
Tabla 5.1.4 Percentiles de confianza.....	74
Tabla 5.1.5 Datos históricos de la primera helada del año.	74
Tabla 5.1.6 Primer fecha de helada por año con su respectivo CDF.	76
Tabla 5.1.7 CDF de que ocurra una temperatura mayor a 35 grados.....	77
Tabla 5.1.8 Comparación de las mejores semillas para el presente proyecto	80
Tabla 5.1.9 Coeficientes de extracción por tonelada de grano.	90
Tabla 5.1.10 Extracción de nutrientes por tonelada de grano	90
Tabla 5.1.11 Cantidad de nutrientes por etapa fenológica.	93
Tabla 5.2.1 Formula de inoculación para semilla.	95
Tabla 5.2.2 Producto de consorcios microbianos.....	97
Tabla 5.2.3 Consorcio microbiano para inoculación de semilla	98

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 3.3.1 Diagrama de regolito y perfil de suelo.....	27
Ilustración 3.3.2 Diagrama de estratas y horizontes del perfil de suelo.....	28
Ilustración 3.3.3 El coloide del suelo: Microestructura y composición.....	29
Ilustración 3.6.1 Diagrama del desarrollo de la metodología	62
Ilustración 5.1.1 Imagen satelital del predio estudiado.....	67
Ilustración 5.1.2 Imagen satelital de la ubicación de la estación meteorológica.	68
Ilustración 5.1.3 Imagen satelital de la distancia entre la estación meteorológica y el predio.....	69
Ilustración 5.1.4 Grafico de probabilidad normal en Minitab.....	72
Ilustración 5.1.5 Grafico de probabilidad normal en Minitab.....	75
Ilustración 5.1.6 Distribución normal en Minitab del rango de fecha con temperaturas igual o más altas a 35 grados.....	77
Ilustración 5.1.7 Imagen satelital del predio con orientación norte sur.	83
Ilustración 5.1.8 Imagen satelital del predio dividido utilizando el método grid sampling.	85

1. INTRODUCCIÓN

El maíz es uno de los cultivos estratégicos de México, por su impacto en la balanza comercial y su relevancia cultural en la alimentación de los mexicanos. Sin embargo, el rendimiento promedio nacional se encuentra en 3.64 toneladas por hectárea, una cifra muy inferior al compararse con Estados Unidos con 10.7 toneladas por hectárea. Esta brecha productiva ha generado una creciente dependencia de importaciones, que en 2024 superaron los 24.8 millones de toneladas de maíz amarillo, principalmente desde Estados Unidos (USDA, 2025).

Al analizar la situación a nivel estatal, Chihuahua presenta un panorama igual de preocupante. A pesar de ser el estado más grande de la república y contar con amplias superficies agrícolas su participación en la producción nacional es menos del 6%. En regiones como la Sierra Tarahumara, los rendimientos de maíz criollo en temporal son críticamente bajos, por debajo de una tonelada por hectárea, lo que obliga a los productores destinar una parte significativa de sus ingresos a la compra de grano forrajero.

Las causas de esta baja productividad son múltiples: prácticas agronómicas desactualizadas, fertilización sin diagnóstico de suelo, escasa tecnificación, nula estandarización de procesos y efectos crecientes del cambio climático (heladas tempranas, sequías recurrentes). Frente a este diagnóstico, el presente proyecto tuvo como objetivo diseñar una metodología de producción basada en principios de ingeniería industrial, aplicando manufactura esbelta y agricultura de precisión, para maximizar el rendimiento del maíz mediante la optimización de insumos y el manejo eficiente del suelo. El estudio se centró en un predio de referencia en Las Cruces, Namiquipa, Chihuahua, con una meta de 12 toneladas por hectárea.

Dado que la validación en campo se realizará en un ciclo posterior a la entrega de este trabajo, la investigación es de carácter teórico. No obstante, se desarrolló una metodología estructurada en 17 pasos, que integra análisis climático, selección de híbridos, corrección de suelos, nutrición fraccionada por etapas fenológicas, manejo de

residuos y protocolos de tratamiento e inoculación de semilla. El presente documento expone el planteamiento del problema, el marco teórico, la metodología propuesta, los resultados del diseño y las conclusiones orientadas a su futura implementación en campo.

1.1. Antecedentes del Problema

En tiempo presente México se encuentra viviendo una paradoja agrícola; es la cuna y epicentro del maíz, siendo este un esencial en la dieta de todos los mexicanos, consumiendo anualmente alrededor de 45 millones de toneladas (Haro, n.d.), la cifra per cápita más alta del mundo. Su rendimiento promedio nacional se estanca en 3.64 toneladas por hectárea (FAO, 2025), apenas un tercio del promedio estadounidense (10.7 t/ha) y muy por debajo de países como Brasil (5.8 t/ha) o Argentina (8.1 t/ha). Esta brecha productiva, genera un déficit que obliga a importar 24.84 millones de toneladas anuales de maíz amarillo, principalmente de Estados Unidos (USDA, 2025), con el fin de cubrir la demanda industrial, vulnerando la soberanía alimentaria y drenando divisas. La situación se agrava en Chihuahua, estado que pese a su extensión territorial y patrimonio genético custodia cuatro razas nativas de maíz: Azul, Gordo, Apachito y Reventador (Rural, 2023) y ocupa apenas el séptimo lugar en producción nacional, contribuyendo con menos del 6% del grano cosechado en el país en 2024 (DGSIA, Anuario Estadístico de la Producción Agrícola, 2025).

En la Sierra Tarahumara, corazón agrícola del estado, los rendimientos de maíz criollo en temporal son críticamente bajos, promediando 639 kg por hectárea en municipios como Guachochi y Batopilas (CIMMYT, 2020). Esta insuficiencia obliga al 80% de las familias rarámuris a destinar hasta el 40% de sus ingresos a la compra de maíz forrajero en temporada de escasez (julio-septiembre), perpetuando ciclos de pobreza (Armendáriz, 2025). Las causas son multifactoriales: prácticas agronómicas obsoletas como el laboreo excesivo que acelera la erosión de suelos ya degradados en un 68% del área cultivable (Echavarria-Chairez, 2023), uso indiscriminado de fertilizantes nitrogenados sin análisis de suelo, solo el 5% de los productores realiza muestreos

(SADER-Chihuahua, 2023) y nula tecnificación, donde apenas el 18% emplea semillas certificadas. A esto se suma el impacto del cambio climático: heladas tempranas en el Altiplano acortan los ciclos fenológicos en 20 días, mientras sequías recurrentes reducen rendimientos hasta en un 30% en años críticos.

Pese a estos desafíos, evidencias locales demuestran potencial de mejora. En Laguna de Aboreachi (Guachochi), la evaluación de seis variedades nativas por el INIFAP (2021) reveló que el maíz Azul Blando alcanzó 2.7 t/ha con mínima tecnificación — triplicando el promedio regional— mediante riego de auxilio y dosificación balanceada de fósforo-zinc. Esto indica que, incluso en condiciones marginales, los rendimientos pueden escalar significativamente. No obstante, políticas públicas como Fertilizantes para el Bienestar —que entrega 300 kg de urea por hectárea sin acompañamiento técnico— han fallado en cerrar brechas, pues ignoran la especificidad edafoclimática y desaprovechan la biodiversidad local. Peor aún, el Programa Producción para el Bienestar excluye a 12 municipios de alta marginación en la Sierra, limitando acceso a créditos para tecnificación (ANEC, 2023).

La paradoja es clara: Chihuahua alberga germoplasma único —el maíz Azul tiene demanda creciente en mercados gourmet de EE.UU. y Europa por sus antioxidantes (CIAD, 2022)—, pero el 90% se vende como grano crudo en mercados locales sin valor agregado, debido a la falta de infraestructura para nixtamalización y comercialización. Mientras, zonas con alto potencial como la región de Babícora —con suelos volcánicos capaces de sostener 8 t/ha según la Secretaría de Desarrollo Rural estatal (2023)— solo cultivan el 15% de su área con técnicas modernas. Ante este escenario, proyectos piloto del CIMMYT en Namiquipa demostraron que la integración de Agricultura de Conservación (cero labranzas, rotación cultivos) puede aumentar rendimientos en un 40%, pero su adopción es mínima por resistencia cultural y desconexión institucional.

La convergencia de estos factores; bajo rendimiento nacional, marginalidad productiva de Chihuahua, subutilización de recursos genéticos y políticas ineficaces. Sustenta la urgencia de este proyecto. Su enfoque en optimización industrial de procesos agrícolas, basado en la resiliencia de maíces nativos y tecnologías escalables, busca

transformar no solo indicadores cuantitativos (elevar rendimientos a 15 t/ha en zonas irrigadas), sino también cadenas de valor, posicionando a Chihuahua como referente de soberanía alimentaria sustentable.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Basado en el rendimiento potencial de la región y literatura, se puede inferir que existe una brecha enorme entre el rendimiento potencial y el rendimiento promedio de 3.64 toneladas por hectárea (DGSIAP, Avance de Siembras y Cosechas, 2025). Cifra inferior a países como Estados Unidos con 10.7 t/ha, Unión europea con 7.9 t/ha y Brasil con 5.8 t/ha (FAOSTAT, 2022). Generando pérdidas potenciales de hasta 35M toneladas y creando dependencia de importaciones de Estados Unidos, 24.84M toneladas en 2024 (USDA, 2025). Esto está fuertemente vinculado a la falta de estandarización de procesos e ineficiencia en insumos.

2.1. Declaración de problema

La producción de maíz en México presenta rendimientos promedio significativamente inferiores al potencial documentado para diversas regiones del país, lo que evidencia la ausencia de metodologías robustas y gestión de procesos que permitan optimizar recursos.

2.2. Descripción del problema.

El rendimiento promedio nacional de maíz presentado en 2024 es de 3.64 t/ha (DGSIAP, Avance de Siembras y Cosechas, 2025), que refleja una brecha entre el desempeño real de los sistemas actuales y el potencial técnicamente alcanzable, el cual ha sido reportado en artículos científicos y en experiencias documentadas de agricultores técnicamente preparados. Por ende, esta brecha no se puede atribuir a un único factor, sino a la interacción de deficiencias técnicas, operativas y de gestión.

El desequilibrio nutricional es uno de los principales problemas que se tienen en el campo. Aunque la utilización de fertilizante va en aumento a comparación de años pasados (Mundial, 2025), en parte por los apoyos dados por el gobierno de México, estos se utilizan de una manera indiscriminada incrementando costos y degradando la calidad del suelo.

La utilización del agua en los cultivos también es un factor determinante en la productividad del maíz. Solo el 18% utiliza sistemas de riego eficientes, por ejemplo, goteo, frente al 89% que depende de riego por gravedad-. Sumado al hecho de que la distribución de los riegos se realiza sin considerar las etapas fenológicas de la planta lo que lleva a una pérdida de rendimiento y productividad del agua. Se puede mejorar la productividad y rendimiento del agua hasta un 64% si los riegos se distribuyen basados en las etapas fenológicas del maíz (Ibarra, 2021), sin mermar el rendimiento del cultivo.

La falta de estandarización en técnicas de siembra y cosecha son causas extra del bajo rendimiento del maíz. Esto se evidencia en la improvisación en la densidad y fecha de siembra: estudios del INTA demuestran que, en ambientes semiáridos, las siembras tardías acumulan mayor humedad en el suelo y reducen la demanda hídrica durante el período crítico del cultivo, siendo más eficiente el uso del agua e incrementando el rendimiento del grano (Rusoci, 2023). Sin embargo, menos del 1% de los productores realiza análisis de suelo para ajustar estos factores, lo que deriva en decisiones empíricas como el uso de densidades homogéneas en lotes heterogéneos. Esta práctica ignora que, por ejemplo, en terrenos con pendiente pronunciada, el rendimiento del maíz disminuye dado que este tipo de terrenos generan altas tasas de erosión y escorrentía (Durán Zuazo, 2014).

Además, la ausencia de protocolos en cosecha agrava las pérdidas: el manejo logístico postcosecha carece de estandarización en parámetros como humedad del grano (<14%) y control de temperatura, provocando mermas del 25-30% por hongos y deterioro. La inexistencia de umbrales numéricos para plagas clave como el gusano cogollero y la fertilización uniforme sin zonificación, reflejan una gestión fragmentada que

desaprovecha herramientas de agricultura de precisión accesibles, perpetuando brechas evitables entre el potencial genético y los rendimientos reales.

2.3. Justificación

La implementación potencial de esta metodología se justifica por su impacto multidimensional, comenzando por la viabilidad económica: de acuerdo con escenarios teóricos, al elevar el rendimiento del maíz hacia niveles cercanos a 12 t/ha en el 50% del área sembrada (5M ha), podrían generarse aproximadamente 16M toneladas adicionales de maíz, lo que contribuiría a reducir las importaciones en hasta un 66% (aprox. USD 2,100M anuales).

Socialmente, esta metodología resulta relevante para los 2.1 millones de pequeños productores que actualmente enfrentan rendimientos críticos (<2 t/ha en Chiapas). Ambientalmente, la dosificación precisa de nutrientes y riego tiene el potencial de reducir la huella hídrica en comparación con prácticas convencionales (900 m³/t vs. 1,800 m³/t), contribuyendo a mitigar la degradación de suelos que actualmente afecta al 68% de las tierras agrícolas.

Además, la estandarización de protocolos postcosecha basados en enfoques de Lean Agri podría permitir reducir las pérdidas del 30% al 8%, en concordancia con experiencias documentadas en la Unión Europea mediante el uso de atmósferas controladas. Como innovación metodológica, la propuesta plantea un modelo que integra herramientas de diseño de experimentos de la ingeniería industrial con fundamentos de fisiología vegetal, constituyendo un enfoque poco documentado en el contexto nacional.

2.4. Hipótesis

La hipótesis que guía la presente investigación se encuentra desarrollada en los apartados siguientes, y se formula con base en el diseño metodológico propuesto, definiendo el alcance analítico del estudio.

2.4.1. Hipótesis general

La aplicación teórica de una metodología basada en ingeniería industrial, orientada a optimizar la dosificación de nutrientes por etapa fenológica (NPK, Zn, B) y a estandarizar los procesos de siembra y cosecha mediante protocolos Lean Agri, tiene el potencial de incrementar el rendimiento del maíz hacia valores cercanos a 12 t/ha en ciclos irrigados, así como de contribuir a la reducción de los costos de producción en alrededor de 23.7% y de las pérdidas postcosecha del 30% al 8%, bajo condiciones de manejo adecuadas.

2.4.2. Hipótesis Específicas.

- **Nutrición vegetal:** La aplicación balanceada de nitrógeno (N) en etapa V6–V8, fósforo (P) en V3–V5 y zinc (Zn) en V10–V12, ajustada mediante modelos de regresión múltiple, podría mejorar la eficiencia de uso de nutrientes (NUE) hasta en un 35%, de acuerdo con relaciones funcionales documentadas entre manejo nutrimental y absorción vegetal.
- **Procesos estandarizados:** La implementación conceptual de protocolos estandarizados para la densidad de siembra (80,000 plantas/ha) y las ventanas de cosecha (≤ 24 horas tras la madurez fisiológica) podría contribuir a reducir la variabilidad operativa del sistema productivo en el orden del 40%, mediante la disminución de dispersiones en las prácticas clave del proceso.

2.5. Objetivos

La baja productividad del maíz en México no solo refleja una ineficiencia agronómica, sino también un desafío de gestión industrial en el uso de insumos, procesos y tecnología. Esta brecha, asociada a la aplicación desequilibrada de nutrientes, la ausencia de estandarización operativa y pérdidas postcosecha cercanas al 30%, compromete la eficiencia del sistema productivo y la seguridad alimentaria.

Frente a este contexto, el presente proyecto propone el desarrollo de una metodología basada en principios de manufactura esbelta orientada a estructurar y optimizar la producción de maíz mediante la integración de agricultura de precisión, optimización de recursos y estandarización de procesos.

2.5.1. Objetivos General

Diseñar una metodología de agricultura industrializada, basada en principios de ingeniería industrial y manufactura esbelta, orientada a mejorar el rendimiento potencial del cultivo de maíz hacia valores cercanos a 12 t/ha mediante la optimización de insumos, la estandarización de procesos productivos y la reducción de pérdidas postcosecha, aplicada como caso de estudio en el noroeste de México.

2.5.2. Específicos

- Modelar requerimientos nutricionales: Desarrollar algoritmos de dosificación variable (VRT) para NPK y micronutrientes, basados en análisis foliar y etapas fenológicas, que permitan simular y evaluar esquemas de manejo nutrimental ajustados al sistema productivo.

- Estandarizar operaciones: Definir protocolos Lean Agri para las etapas de siembra (precisión ± 2 cm) y cosecha (humedad de grano $\leq 14\%$), orientados a reducir la variabilidad operativa del proceso.
- Integrar el proceso productivo: Estructurar el proceso productivo del maíz incorporando las etapas de nutrición, operación agrícola y manejo postcosecha dentro de una metodología que permita analizarlos de forma conjunta.
- Evaluar el desempeño metodológico: Analizar, a partir de escenarios técnicos y parámetros operativos definidos en la literatura, el comportamiento esperado del proceso productivo diseñado en términos de rendimiento, uso de insumos y pérdidas postcosecha.

2.5.3. Supuestos

Supuestos agronómicos:

- Los híbridos de maíz considerados en el estudio cuentan con un potencial genético igual o superior a 15 t/ha bajo condiciones óptimas.
- Las condiciones físicas del suelo permiten la aplicación de prácticas de manejo y corrección nutrimental consideradas dentro del diseño metodológico.

Supuestos tecnológicos:

- Los datos históricos reportados por el SIAP se consideran consistentes y suficientemente confiables para su uso como referencia, con un margen de error estimado menor o igual al 5%.
- La información climática y productiva utilizada refleja de manera razonable el comportamiento promedio de los sistemas agrícolas analizados, sin considerar eventos extremos atípicos.

Supuestos metodológicos:

- El estudio se desarrolla bajo un enfoque de diseño y análisis metodológico, por lo que las estimaciones de desempeño corresponden a escenarios técnicos y no a resultados validados experimentalmente en campo.
- Los principios de ingeniería industrial y manufactura esbelta pueden ser adaptados al contexto agrícola sin modificar los fundamentos agronómicos del cultivo.

2.6. Alcances y Limitaciones

La metodología propuesta se define a partir de los alcances y limitaciones establecidos por los objetivos del estudio y por las condiciones técnicas, económicas y operativas bajo las cuales se desarrolla la investigación.

2.6.1. Alcances

- El área de estudio se limita al predio ubicado en Las Cruces, municipio de Namiquipa, Chihuahua, con una superficie máxima considerada de hasta 10 hectáreas.
- El análisis se enfoca en el uso de un solo material híbrido de maíz, con el fin de establecer los requerimientos nutrimentales.
- Los procesos analizados abarcan desde la labranza y preparación del suelo hasta la etapa de cosecha, incluyendo las principales operaciones del ciclo productivo agrícola.

2.6.2. Limitaciones

- Las condiciones climáticas de la región, en particular el riesgo de sequías durante los meses de julio y agosto, así como la ocurrencia de heladas

tempranas, pueden limitar la duración del ciclo agrícola efectivo, acortándolo entre 15 y 20 días.

- Debido a restricciones económicas, la metodología propuesta no podrá ser validada experimentalmente durante el periodo de desarrollo de la investigación, al requerir una inversión significativa para su implementación en campo.
- La heterogeneidad de los suelos presentes en el área de estudio requiere un esquema de muestreo por micro-lotes (≤ 3 ha), lo que incrementa los costos de análisis de suelo en aproximadamente un 25%.

3. MARCO TEÓRICO

Este marco teórico explora los modelos de daño acumulado, distribuciones estadísticas y métodos de validación, proporcionando una base para entender y resolver estas diferencias. Su objetivo es sustentar el desarrollo de un modelo unificado que mejore la precisión en la predicción de fallas.

3.1. Maíz y sus Variables

El maíz constituye el eje fundamental de la seguridad alimentaria, economía rural y cultura mexicana. Representa el 45% de las calorías diarias en la dieta nacional (Andreou, 2024). Su triple función como alimento humano (principalmente maíz blanco), insumo pecuario (maíz amarillo) y materia prima industrial lo posiciona como el cultivo agrícola más estratégico del país, con implicaciones políticas y sociales que moldearon la historia mesoamericana y definen la soberanía alimentaria contemporánea.

El maíz es parte de la familia Poaceae y deriva de un proceso único de coevolución humano-vegetal. Desde el punto de vista botánico, el maíz es una monocotiledónea perteneciente al grupo de las gramíneas. Estudios genéticos confirman que fue domesticado a partir del teosinte en México hace más de 9,000 años (Hermsen, 2023). Las evidencias más antiguas incluyen:

- Polen fosilizado de 8,700 años en Guerrero (Hermsen, 2023).
- Mazorcas de 6,000 años en cuevas de Oaxaca y Puebla (Hermsen, 2023).
- Este proceso implicó una transformación morfológica radical: desde una gramínea con granos encapsulados hasta una planta con mazorcas desnudas y granos expuestos, incapaz de dispersarse sin intervención humana (Hermsen, 2023).

México alberga la mayor diversidad genética global con 59 razas nativas de 346 a nivel mundial, agrupadas en 6 complejos raciales (Figueroa Cárdenas, 2013).

3.1.1. Etapas fenológicas del maíz

Todo desarrollo de cultivo cuenta con distintas etapas consecutivas donde se da el crecimiento y reproducción de la planta. Se le conoce como el ciclo de desarrollo a las distintas etapas que conforman desde la germinación de la semilla hasta la formación completa del fruto. La identificación de estas etapas sigue el sistema estandarizado de Ritchie et al. (1993), basado en el conteo de hojas con lígula visible (etapas vegetativas) y características morfológicas específicas de los órganos reproductivos (etapas reproductivas). Esto es muy importante porque permite identificar qué elementos requiere la planta en cada fase. Un cultivo no necesita la misma cantidad de nutrientes, como el nitrógeno, durante el estado vegetativo que en el reproductivo. Por eso es necesario tener claridad sobre el estado en el que se encuentra el cultivo y comprender su transición entre estas fases, para ajustar correctamente el manejo nutrimental.

VE – Emergencia

Ocurre cuando la primer hoja llamada coleóptilo perfora la superficie del suelo. La radícula primaria se establece y comienza el desarrollo de raíces seminales (InfoAgronomo, 2024). El coleóptilo emerge del lado del embrión del grano y es empujado hacia la superficie del suelo por la elongación del mesocotilo. En este estado la semilla absorbe aproximadamente 30% de su peso en agua para activar el metabolismo embrionario.

V1 – Primera hoja

La primera hoja se despliega completamente con lígula visible. La hoja tiene una punta redondeada característica. El punto de crecimiento permanece bajo la superficie del suelo. El sistema radicular seminal domina la absorción. En este punto se requiere de 1.5 a 2 mm de agua al día y nutrientes específicos.

V2 – Segunda hoja

Segunda hoja completamente desarrollada con lígula visible. Inicio de la formación de raíces nodales a partir del nudo inferior. Las raíces seminales comienzan a envejecer. Es poco probable que las heladas dañen las plántulas de maíz, a menos que haga mucho frío o que el maíz se sembró superficialmente.

V4 – Cuarta hoja

Las raíces nodales son dominantes y ocupan más volumen de suelo que las raíces seminales. Hojas aún en desarrollo en el meristemo apical y comienza la elongación del tallo.

V5 – Quinta hoja

Quinta hoja completamente desarrollada. El punto de crecimiento emerge sobre la superficie del suelo. Inicia la diferenciación de la espiga.

V6 – Sexta hoja

Sexta hoja completamente desarrollada. La primera hoja con punta redondeada comienza a senescer. La espiga principal tiene todos sus órganos florales iniciados. Desde esta etapa se puede determinar el número potencial de hileras de grano. Este número potencial se puede ver afectado por genética, medio ambiente y se reduce por condiciones de estrés. La absorción rápida de nutrientes comienza en esta etapa.

V10 – Diez hojas

Las raíces de anclaje comienzan a desarrollarse en los nodos inferiores de las plantas sobre el suelo. La planta alcanza el 50% de su altura final, y hasta esta etapa, la tasa de desarrollo de la hoja es de aproximadamente 2 a 3 días por hoja.

V14 – Catorce hojas

La planta alcanza su altura máxima. Esta etapa ocurre aproximadamente dos semanas antes de la floración. Muy sensible al estrés por calor y sequía. De cuatro a seis hojas adicionales se expandirán desde esta etapa hasta VT.

VT

Se establecen los granos potenciales por fila, se determina el número final de granos potenciales (número de óvulos) y el tamaño potencial de la mazorca. La última rama de la panoja es visible en la parte superior de la planta. La planta está casi en su altura máxima.

R1 - Floración

La etapa R1 comienza cuando los estigmas emergen de la cascara o mazorca. En este punto es cuando ocurre la polinización. Dado que desde el punto de vista botánico el maíz es una planta alógama; que tiene ambos sexos en la misma planta. La espiga corresponde a la flor masculina, mientras que los estigmas que salen de la mazorca corresponden a la flor femenina. La polinización se da cuando el polen de la flor cae sobre los estigmas. Aquí es cuando se determina el potencial de granos, por lo cual el calor puede limitar el potencial.

R2 – Grano Lechoso

Ocurre aproximadamente 12 días después de la polinización. En este punto los estigmas comienzan a oscurecerse y secar, mientras a su vez el grano se comienza a desarrollar. Volviéndose visibles con un color blanco con un relleno lechoso translucido debido a la alta humedad, aproximadamente un 85%. Para este punto aún es muy sensible a las altas temperaturas ya que pueden ocasionar aborto de granos.

R3 - Grano Lechoso/Masoso

Esta se presenta aproximadamente de 18 a 22 días después de la polinización. En este punto es visible dado que los estigmas se secan completamente y los granos se tornan de un color amarillizo, mientras que el interior se vuelve más denso y aumenta la acumulación de almidón.

R4 - Grano Masoso

Aproximadamente 24 a 30 días después de R1. El líquido del grano se vuelve una masa suave al tacto, disminuyendo la humedad a un 70%. Para este punto el número de

granos está definido, y se comienza a definir el peso del grano. También en esta etapa por la acumulación de tiempo las heladas pueden disminuir el rendimiento hasta en un 25%.

R5 - Dentado

Se presenta entre 35 a 42 días después de R1. El llenado de grano es casi total. La humedad del grano se reduce a aproximadamente un 55 % (38 a 42 días después de R1) a medida que aumenta el contenido de almidón. El estrés aún puede reducir el peso del grano.

R6 – Madurez

Es la etapa final del ciclo, donde se define dado que se forma una capa negra en la base del grano, bloqueando el movimiento de materia seca y nutrientes de la planta al grano, los cuales alcanzaron su peso máximo. Ya para este punto las heladas o estrés hídrico no afecta el rendimiento, solamente si ocurre un daño físico de la planta o grano.

3.2. pH del Suelo

El pH del suelo es un parámetro fundamental que determina su acidez o alcalinidad, influyendo directamente en la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiana y la salud general de los cultivos. Para mediar ambos extremos de acidez y alcalinidad está el agua en su estado 100% puro, debe tener un pH de 7, o sea es neutro. Un pH neutro significa que el agua no es ácida ni es alcalina, es simplemente neutra. El pH se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno en una solución, escalando entre 0 y 14 (Day, 1993).

Esta misma lógica de clasificación se aplica en agronomía para evaluar la calidad del suelo para la agricultura. Los suelos con un pH entre 7 y 8 presentan una alcalinidad ligera. En este rango, la acidez está esencialmente ausente y la capacidad tampón del suelo es tal que puede neutralizar la adición de ácidos hasta cierto punto. Una alcalinidad

moderada se sitúa entre pH 8 y 9, donde la mayoría de los cultivos comienzan a experimentar problemas significativos de disponibilidad de nutrientes. Valores superiores a 9 se consideran fuertemente alcalinos, haciendo que el cultivo de la gran mayoría de las especies sea prácticamente inviable. Estudios de caracterización de suelos agrícolas, como el realizado por (Santander, 2024) en el Valle del Mezquital, identifican suelos con pH superior a 7.5 y sodicidad, los cuales inducen deficiencias de nitrógeno, manganeso, hierro, zinc y cobre en los cultivos (Kumar, 2025). Investigaciones en suelos agrícolas de India reportan rangos de pH de 7.0 a 8.36, indicando condiciones neutras a ligeramente alcalinas donde la disponibilidad de nutrientes como zinc y boro puede ser limitada. De manera similar, en terrenos agrícolas de Yunnan, China, se han identificado suelos generalmente alcalinos (pH medio 7.9) con deficiencias generalizadas de fósforo, hierro y cobre, lo que confirma los desafíos de fertilidad asociados a la alcalinidad (Zhou, 2025).

Cada cultivo posee un rango de pH ideal para su desarrollo óptimo. Por ejemplo:

- Caña de azúcar: Se desarrolla de manera óptima en suelos ácidos, con un pH ideal alrededor de 5.
- Granos básicos (como frijol, arroz): Pueden tolerar un rango de pH de 4.5 a 5, aunque su rendimiento puede verse mermado. El rango ideal para maximizar la cosecha se sitúa entre 5.5 y 6.
- Maíz blanco y amarillo: Ambos tipos de maíz prefieren suelos ligeramente ácidos a neutros, con un rango de pH ideal que oscila entre 5.8 y 7.0. Dentro de este margen, se asegura una óptima disponibilidad de nutrientes críticos como el nitrógeno y el fósforo.
- Hortalizas: Prefieren un rango más específico, entre pH 6 y 6.5.
- Frutales: Muestran una mayor adaptabilidad, prosperando en un rango más amplio de 5.5 a 7.
- Césped (Gramma) y Flores: El césped es particularmente adaptable, pero su pH óptimo se encuentra alrededor de 6.5.

Es crucial enfatizar que estos valores son indicativos y funcionan como una guía general. La productividad final de un cultivo no depende exclusivamente del pH, sino de la interacción de múltiples factores como la fertilidad inherente del suelo, las condiciones climáticas y la disponibilidad de agua. Un pH fuera del rango ideal no implica necesariamente la imposibilidad de cultivar, pero puede reducir el potencial de rendimiento. El rango de pH óptimo para el cultivo se sitúa entre 5.5 y 7. En este intervalo, la disponibilidad de los nutrientes esenciales para las plantas es máxima. Dentro de esta franja, el nitrógeno se encuentra relativamente abundante, el fósforo, aunque inicialmente puede presentar cierta limitación logra una buena disponibilidad, y nutrientes como el potasio y el azufre son fácilmente accesibles.

La problemática principal surge cuando el pH del suelo se desvía significativamente de este rango ideal:

- En suelos excesivamente ácidos ($\text{pH} \leq 4.5 - 5$):
 - La disponibilidad de fósforo (P) y potasio (K) se ve severamente limitada, lo que puede generar deficiencias.
 - Por el contrario, elementos como el hierro (Fe), el manganeso (Mn) y el aluminio (Al) se solubilizan en exceso, pudiendo alcanzar concentraciones tóxicas para la mayoría de los cultivos.
- En suelos excesivamente alcalinos ($\text{pH} > 8 - 8.5$):
 - La asimilación del nitrógeno (N) se dificulta.
 - Se produce una drástica reducción en la disponibilidad de micronutrientes como hierro (Fe), cobre (Cu) y zinc (Zn), generando deficiencias cloróticas en las plantas. Esta problemática es central en el manejo de cultivos en regiones áridas y semiáridas (Falen, 2025).
 - Aumenta el riesgo de toxicidad por boro (B).

El concepto clave es la disponibilidad nutricional. Un suelo puede contener cantidades adecuadas de todos los minerales, pero si el pH no es el correcto, estos permanecen químicamente "bloqueados" o "inmovilizados". Esto ocurre porque las partículas de arcilla y materia orgánica del suelo tienen cargas eléctricas que retienen con fuerza a los iones de los nutrientes, impidiendo que se disuelvan en la solución del suelo y, por lo tanto, que las raíces de las plantas puedan absorberlos. El rango de pH de 5.5 a 7 optimiza las condiciones químicas para que estos nutrientes se liberen y estén disponibles para la planta. Por lo tanto, la acidez o alcalinidad excesiva del suelo representa fundamentalmente un problema de disponibilidad de nutrientes, no necesariamente de su ausencia total. Los elementos esenciales se encuentran presentes, pero en formas químicas no asimilables para las plantas.

Además de esta limitación nutricional, un pH inadecuado propicia condiciones favorables para el desarrollo de plagas y enfermedades. Entre los insectos que proliferan en suelos ácidos se encuentra la gallina ciega (*Phyllophaga* spp.), cuyo estado larvario y adulto causa graves daños a los cultivos. Esta plaga es particularmente voraz con los granos básicos, atacando el sistema radicular de prácticamente todas las plantas que constituyen nuestra base alimentaria.

De igual manera, los nematodos fitoparásitos –organismos microscópicos con aspecto de gusanos– encuentran en estos suelos un ambiente propicio para infestar las raíces vegetales. El daño se agrava cuando tanto coleópteros como nematodos provocan heridas en las raíces, ya que estas lesiones sirven como puerta de entrada para hongos y bacterias patógenas. Un ejemplo claro es el mal del talluelo (*Rhizoctonia* spp.), que afecta plántulas de arroz –entre otros cultivos– manifestándose mediante tallos secos, raíces severamente dañadas y manchas características en la parte aérea de la planta.

Cuando el pH es extremadamente alcalino, surten problemáticas diferentes, pero igualmente críticas: limitación de otros nutrientes, toxicidades específicas y desequilibrios microbiológicos.

Un aspecto particularmente relevante en suelos ácidos es la problemática de los anti nutrientes, siendo el aluminio el caso más representativo. Este elemento, abundantemente presente en la corteza terrestre, es absorbido por las plantas en condiciones de bajo pH como si fuera un nutriente, pero en realidad interfiere con la absorción de elementos benéficos. El aluminio desplaza a nutrientes esenciales en los procesos de absorción radicular y genera toxicidad intracelular, afectando gravemente el desarrollo vegetal. Así, la acidificación del suelo conlleva inevitablemente problemas asociados a la toxicidad por aluminio, entre otras complicaciones. En concentraciones tóxicas, inhibe el crecimiento radicular, restringe la absorción de agua y nutrientes, induce estrés oxidativo y daña el citoesqueleto y el ADN de las células vegetales (Ofoc, 2023). Las plantas han desarrollado mecanismos de tolerancia, como la exudación de ácidos orgánicos (malato, citrato, oxalato) que quelatan el aluminio en la rizosfera, evitando su entrada a las raíces (Ofoc, 2023).

La determinación del pH del suelo puede realizarse mediante diversos métodos, que varían en precisión, complejidad y costo. La elección del método depende del balance requerido entre precisión, costo y practicidad para el usuario, aunque para decisiones agronómicas críticas, la bibliografía recomienda el análisis de laboratorio basado en normas oficiales como la NOM-021-RECNAT-2000. Estudios recientes que comparan protocolos de muestreo, como el de LUCAS Soil y los procedimientos italianos, demuestran que es posible armonizar datos de diferentes fuentes para la mayoría de las propiedades fisicoquímicas, incluyendo pH, aunque recomiendan precaución con indicadores biológicos debido a su mayor heterogeneidad (Del Duca, 2025).

1. Análisis de laboratorio: El método más preciso y confiable consiste en la toma de muestras representativas de suelo y su envío a un laboratorio especializado y certificado. Este procedimiento garantiza resultados exactos y está respaldado por análisis complementarios.
2. Papel indicador (Tornasol): Una alternativa práctica y económica es el uso de papel pH o tiras reactivas. Este método, aunque menos exacto, ofrece una aproximación rápida y accesible.

3. Sensores de pH directos: Existen sondas o sensores portátiles diseñados para insertarse directamente en la tierra húmeda. Estos dispositivos proporcionan una lectura digital rápida y son más precisos que el papel tornasol, aunque requieren una inversión moderada.
4. Medidores electrónicos de pH: Estos equipos, que funcionan con baterías, ofrecen una alta precisión. Para usarlos correctamente, se debe calibrar el dispositivo regularmente con soluciones buffer de pH conocido y mantener el electrodo escrupulosamente limpio.

Para mantener un pH adecuado del suelo, se recomienda incorporar los desechos de cosecha de manera estratégica. Si bien es aceptable utilizar una parte de estos residuos para alimentación animal, es fundamental conservar una porción significativa para reintegrarla al sistema edáfico. En suelos pesados, característicos de muchas regiones de Sudamérica, esta incorporación requiere necesariamente el uso de maquinaria agrícola especializada. Para suelos de textura ligera o con predisposición a procesos erosivos, generalmente es suficiente mantener una capa de cobertura superficial sin incorporación profunda, estrategia que además protege contra la erosión hídrica y eólica.

La quema de rastrojos constituye una práctica desaconsejable desde múltiples perspectivas. Aunque algunos agricultores persisten en este método con la expectativa de eliminar plagas fúngicas y semillas de malezas, la evidencia empírica demuestra su ineficacia a mediano y largo plazo. Suelos sometidos a quemas anuales sistemáticamente continúan presentando problemas recurrentes de malezas, debido a que numerosas especies vegetales han desarrollado adaptaciones termorresistentes en sus propágulos. Alternativas viables incluyen la implementación de rotaciones de cultivos con especies no hospedadoras de las plagas presentes, el procesamiento de la materia orgánica mediante compostaje o su incorporación profunda mediante labranza adecuada.

El impacto negativo de las quemas se fundamenta en procesos termoquímicos análogos a los ocurridos durante la manufactura de cerámicos. La aplicación intensiva de calor induce transformaciones mineralógicas que resultan en la inmovilización de

nutrientes y la progresiva pérdida de fertilidad edáfica. Un estudio en campos de trigo en Irak demostró que la quema de residuos de cosecha disminuye significativamente la materia orgánica del suelo (de 15.63 a 11.78 g/kg) y reduce la concentración de magnesio, un nutriente esencial (Tawfeeq, 2025). Asimismo, una investigación en Tucumán, Argentina, reveló que la quema de residuos de caña de azúcar reduce las poblaciones de microorganismos benéficos y altera procesos enzimáticos claves para el reciclaje de nutrientes y la formación de materia orgánica, comprometiendo la fertilidad natural del suelo a largo plazo (Universidad Nacional de Tucumán, 2025). Adicionalmente, esta práctica genera emisiones atmosféricas de compuestos contaminantes, por lo que la incorporación racional de materia orgánica se presenta como alternativa técnicamente superior y ambientalmente sostenible.

La corrección de suelos ácidos, caracterizados por elevadas concentraciones de iones de hidrógeno (H^+), requiere la aplicación de enmiendas calcáreas específicas. Una revisión exhaustiva de estudios en Europa y Norteamérica confirma que el encalado es una estrategia efectiva para la amelioración de la acidez del suelo (Wenyika, 2025).

El hidróxido de calcio $[Ca(OH)_2]$, aunque de naturaleza cáustica, muestra especial efectividad en suelos extremadamente ácidos ($pH < 4.5$), requiriendo necesariamente un periodo de entre 15 y 30 días entre aplicación y siembra para permitir su completa reacción y evitar fitotoxicidades. La reacción química fundamental involucra la neutralización de protones: $Ca(OH)_2 + 2H^+ \rightarrow Ca^{2+} + 2H_2O$.

La cal dolomítica $[CaMg(CO_3)_2]$, que aporta simultáneamente calcio y magnesio, representa la opción ideal para suelos con deficiencia concurrente de magnesio, aunque resulta contraproducente cuando existen niveles elevados previos de este nutriente debido a la inducción de antagonismos catiónicos. El carbonato de calcio $[CaCO_3]$ constituye una opción de acción más gradual y menos agresiva, adecuada para correcciones moderadas y mantenimiento de pH en suelos ya estabilizados.

La selección de la enmienda óptima debe considerar simultáneamente el contenido mineralógico basal del suelo (especialmente magnesio intercambiable), el estado

fenológico del cultivo y las consideraciones económicas regionales. El hidróxido de calcio, además de su función correctora, puede ejercer efectos supresivos sobre poblaciones de nematodos fitoparásitos y otros patógenos edáficos en casos de infestaciones severas, aunque simultáneamente reduce temporalmente la actividad microbiana beneficiosa.

Para la acidificación de suelos alcalinos, el ácido fosfórico (H_3PO_4) representa una opción técnicamente avanzada, aunque económicamente costosa, recomendable principalmente para cultivos de alto valor comercial mediante sistemas de irrigación localizada que permitan una dosificación precisa. El sulfato de amonio $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$, como fertilizante nitrogenado de reacción acidificante, ofrece una alternativa para acidificación gradual en sistemas extensivos, aunque su efecto es menos inmediato y predecible debido a la mediación microbiana en su transformación bioquímica.

En el manejo agronómico de cultivos en suelos alcalinos, la nutrición mineral con zinc es crucial. Por ejemplo, el nogal pecanero es particularmente sensible a la deficiencia de zinc en suelos con pH alcalino, donde el carbonato de calcio reacciona con el zinc disminuyendo su biodisponibilidad. Investigaciones como la de (Olivas-Tarango, 2024) demuestran que la aplicación de quelatos de zinc al suelo en estos contextos mejora parámetros fisiológicos como el diámetro del tronco y la longitud del brote, así como componentes del rendimiento, ofreciendo una alternativa para superar las limitaciones impuestas por la alcalinidad (Olivas-Tarango, 2024).

El incremento sostenido de materia orgánica edáfica complementa las enmiendas químicas al mejorar simultáneamente la capacidad tampón del suelo, la actividad microbiana beneficiosa y la capacidad de intercambio catiónico, mejorando la disponibilidad de nutrientes incluso en condiciones de pH subóptimas mediante procesos de complejación orgánico-mineral.

La determinación de dosis específicas y metodologías de aplicación constituye una etapa técnica que requiere necesariamente del previo análisis edafológico y la consideración de las condiciones agroecológicas particulares de cada sistema productivo,

siendo imprescindible el monitoreo continuo del pH y los nutrientes intercambiables durante el proceso de corrección.

3.3. Tipos de Tierras

El estudio de la edafología comienza, en primer término, por definir qué es el suelo. El suelo constituye la base sobre la cual transcurre la existencia: todo lo que fue, todo lo que es y todo lo que será en la vida ocurre sobre él. Aunque se haya nacido en un hospital, ese hospital se asienta sobre un suelo; de igual manera, la escuela a la que se asiste y la casa que se habita están edificadas sobre él. Todos los aspectos fundamentales de la vida humana tienen lugar sobre el suelo. Desde la perspectiva agrícola, resulta igualmente fundamental reconocer que el suelo es el medio en el cual se cultivan los alimentos. Prácticamente todo lo que se consume diariamente proviene de él. Si bien existe la hidroponía como alternativa para el cultivo de plantas sin suelo, esta representa menos del uno por ciento de la producción mundial de alimentos.

Otro aspecto relevante que se debe considerar es que la capa más externa y fragmentaria del globo terráqueo recibe el nombre de regolito. Esta noción resulta familiar cuando se observan programas de astronomía dedicados al estudio de estrellas y planetas: en cuerpos rocosos como Marte, también se encuentra una especie de regolito. Es decir, todos los planetas rocosos poseen, de alguna manera, un tipo de suelo. Asimismo, es importante señalar que bajo el mar también existe suelo, pues el océano se asienta sobre un suelo marino. De este modo, el suelo parece ser un elemento presente en casi todo el universo. Podría afirmarse que en todos los planetas rocosos que existan en el universo hay un regolito y, consecuentemente, probablemente también algún tipo de suelo. Quizás carezca de materia orgánica, pero estaría compuesto por minerales, algún tipo de gas y posiblemente alguna forma de líquido —no necesariamente agua, sino quizás metano, nitrógeno líquido u otras sustancias de naturaleza exótica.

Por lo tanto, como definición, se puede establecer que el suelo es un cuerpo natural que ocupa un espacio tridimensional (Nordt, 2025). Como se observa en la Ilustración 3.3.1, el suelo está formado por diferentes materiales que, a través de procesos destructivos y de síntesis, se van transformando y organizando. Se trata de un sistema conformado por fases —aspecto que se abordará más adelante— y forma parte del material fragmentado de la superficie terrestre, es decir, del regolito. El regolito, como se

ha mencionado, corresponde a todo el material fragmentado que yace sobre la roca dura en un planeta rocoso, tal como ocurre en la Tierra. Dentro de ese regolito es donde se encuentra el suelo.



Ilustración 3.3.1 Diagrama de regolito y perfil de suelo

Cuando se habla de un perfil de suelo, como los que se muestran en la parte inferior de la figura, se hace referencia a una sección vertical tridimensional que se extiende desde la superficie hasta el material parental o rocoso subyacente (Jiménez-Ballesta, 2024). Estos perfiles se obtienen mediante la excavación de una calicata, que permite examinar el suelo en su estratificación natural. Al observarlo, se identifican los horizontes, que son capas más o menos paralelas a la superficie del suelo. Cada horizonte posee propiedades similares, características de formación parecidas y ha sido moldeado por procesos genéticos afines, lo que refleja la historia y evolución del suelo a lo largo del tiempo (Jiménez-Ballesta, 2024). Además, los horizontes del suelo presentan similitudes en cuanto a color y disposición, ya que son capas aproximadamente paralelas a la superficie. Estas capas se encuentran en prácticamente todos los suelos y pueden identificarse al realizar una calicata. Entre ellos se distinguen horizontes orgánicos, compuestos exclusivamente por materia orgánica, y horizontes minerales, como el horizonte A, el horizonte E, el horizonte B y otros. En estos horizontes minerales ocurren procesos de lavado y transformación de las propiedades del suelo, así como acumulación de materiales. Por debajo de ellos se localiza la roca madre, que corresponde a otro horizonte

de tipo mineral, ya sea roca fragmentada o roca sólida. En conjunto, estos horizontes — orgánicos, minerales y rocosos— son los que se encuentran en la mayoría de los suelos al ser examinados en campo.

Por otra parte, el concepto de estrata se refiere a capas que se delimitan de manera arbitraria con base en alguna característica distintiva, como el color, la textura, la presencia de piedras, raíces, acumulación de sales u otros aspectos relevantes (The National Committee on Soil and Terrain , 2024). A diferencia de los horizontes, que responden a procesos genéticos y de formación, las estratas se definen según criterios observables en el perfil del suelo. Presentada en la Ilustración 3.3.2 se observan diversas estratas, algunas de las cuales, en conjunto, podrían llegar a conformar horizontes. La totalidad de la imagen corresponde a un perfil de suelo. Estos conceptos constituyen las primeras definiciones fundamentales para comprender qué es el suelo: un constituyente que forma parte del regolito y que resulta esencial para la vida.



Ilustración 3.3.2 Diagrama de estratas y horizontes del perfil de suelo

Se busca que estas definiciones —suelo, perfil, horizonte y estrato— sean manejadas con claridad, pues resultan de gran importancia en el trabajo agrícola. Gracias a este lenguaje técnico es posible, posteriormente, realizar análisis de suelo y estudios edafológicos que son fundamentales para las siembras y plantaciones. En la agricultura moderna y de precisión, estos datos resultan indispensables.

Como se mencionó anteriormente, el suelo está formado por tres fases: una fase líquida, una fase gaseosa y una fase sólida (Yousuf, 2025). Esta última, a su vez, se divide en componentes minerales y orgánicos. De este modo, el suelo se concibe como un sistema trifásico que presenta distintas proporciones de cuatro componentes íntimamente relacionados: la parte sólida mineral, la materia orgánica, el agua y el gas. Las interacciones entre estas fases son cruciales, ya que determinan procesos como la sedimentación, la solubilidad de nutrientes y el transporte de contaminantes en el sistema (Yousuf, 2025). En cualquier suelo del mundo, al realizar una excavación y tomar una muestra en la mano, se puede observar que contiene materia orgánica, minerales y una gran cantidad de poros. Estos poros pueden ser de diversos tamaños y, cuando están llenos de agua, contienen la fase líquida; cuando no, albergan gases. Más adelante se abordará el tema de los coloides, estrechamente relacionados con la porosidad y la dinámica del agua en el suelo. Estas son, en esencia, las fases fundamentales que componen el suelo y que deben ser comprendidas adecuadamente.

En la imagen de la Ilustración 3.3.3 se observan las partículas minúsculas que componen el suelo, entre las cuales las más pequeñas suelen ser las arcillas.

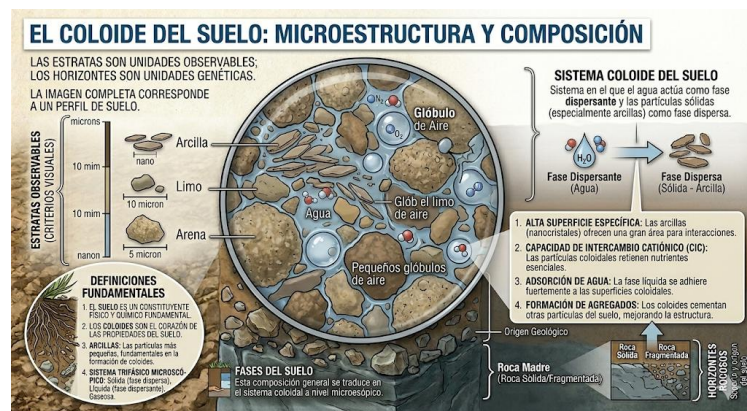


Ilustración 3.3.3 El coloide del suelo: Microestructura y composición

Estas partículas se encuentran acompañadas de pequeños glóbulos de aire y, en los espacios intersticiales, agua. Esta disposición da lugar a un sistema en el que el agua actúa como fase dispersante y las partículas sólidas como fase dispersa, generando un

constituyente físico de gran interés denominado coloide. El estudio de los coloides resulta fundamental para comprender las propiedades físicas y químicas del suelo.

En cuanto a las proporciones ideales de los componentes del suelo, aunque no siempre se cumplen en cualquier terreno, se considera una representación equilibrada aquella que contiene aproximadamente entre un 20 y un 25% de agua, un 25% de aire, un 3 a 4% de materia orgánica y el resto correspondiente a material mineral. Estas cifras constituyen una referencia teórica útil para evaluar la calidad y funcionalidad de un suelo. Para complementar el tema de las fases del suelo, se pueden citar ejemplos característicos del sur de Chile, como los suelos Trumao de la Décima Región, los suelos Añade y los suelos rojo-arcillosos. Los Trumao presentan un porcentaje de porosidad que oscila entre el 60 y el 70%, mientras que los Añade alcanzan valores del 70 al 80% y los rojo-arcillosos se sitúan entre el 50 y el 55%. En cuanto al contenido de materia orgánica, los Trumao muestran valores que van del 4 al 20%, lo que representa una dotación elevada en comparación con muchos otros suelos. Los suelos Añade, por su parte, presentan contenidos de materia orgánica entre el 4 y el 6%, una cantidad considerada más que moderada. Estas características ilustran la diversidad de propiedades que pueden presentar los suelos de una misma región.

Otro aspecto de gran importancia es el proceso de formación del suelo, es decir, su génesis. Todo suelo tiene su origen en una roca madre o en un mineral parental. A partir de ese material rocoso se inicia la formación del suelo, y de las características de esa roca madre derivarán, en gran medida, las propiedades que el suelo presente. Desde el punto de vista agrícola, lo que más interesa es el tipo de elementos minerales esenciales para el crecimiento de las plantas que estarán presentes en ese suelo como resultado de su génesis. Todos los suelos proceden de rocas y minerales a través del proceso de intemperización o meteorización. Este proceso consiste en la destrucción gradual de las rocas a lo largo del tiempo, debido a la acción combinada de diversos factores. Entre ellos se encuentran los cambios de temperatura, que provocan dilataciones y contracciones; las lluvias, que pueden tener carácter ácido; la acción de microorganismos; y otros agentes meteorizantes. Con el paso del tiempo, estos factores van rompiendo y descomponiendo

la roca, dando lugar a los materiales que, tras sucesivas transformaciones, acabarán formando el suelo.

Otro aspecto fundamental en la génesis del suelo es el proceso de fragmentación de la roca. Cuando una roca cae desde una altura, por ejemplo, se rompe y se fragmenta; esa fragmentación constituye el punto de partida de la formación del suelo. Este proceso se inicia, como se ha señalado, a partir de una roca madre, la cual puede ser de tres tipos principales: ígneas, sedimentarias o metamórficas. Las rocas ígneas derivan de material volcánico, como la ceniza, o de batolitos y lavas que se solidificaron en la superficie después de haber estado fundidas. Las rocas sedimentarias se forman a lo largo del tiempo, generalmente en ambientes marinos, mediante la acumulación y compactación de sedimentos que terminan consolidándose. Las rocas metamórficas, por su parte, son el resultado de la transformación de rocas preexistentes sometidas a condiciones de alta presión y temperatura; ejemplos clásicos son la pizarra —que a menudo se confunde con sedimentaria, pero es metamórfica— y el mármol.

La intemperización o meteorización que actúa sobre estas rocas puede ser de tipo físico o químico. Con el paso del tiempo, este proceso va rompiendo y desgastando la roca, generando partículas cada vez más pequeñas. Estas pueden ir desde fragmentos de roca de un metro de diámetro hasta partículas tan diminutas como las arcillas, que miden menos de dos micras. Este continuo proceso de fragmentación y transformación, regulado por cinco factores de formación, da origen a la diversidad de suelos que se observan en la naturaleza.

- El primero de los factores directos en la formación del suelo es el clima, el cual ejerce una influencia determinante en el proceso de génesis edáfica (Johnson, 2024). No es lo mismo un clima desértico que uno propio de una zona templada. En las regiones templadas, las condiciones climáticas favorecen una mayor disponibilidad de agua, lo que a su vez incrementa la actividad biológica y los procesos de meteorización, tanto física como química. Los cambios de temperatura y la presencia de humedad constante aceleran la fragmentación de las rocas y la transformación de los minerales, dando lugar a suelos más desarrollados y profundos. Por el contrario, en climas áridos la escasez de agua limita estos

procesos, resultando en suelos poco evolucionados. De esta manera, el clima actúa como un motor fundamental en la formación y evolución de los suelos a lo largo del tiempo.

- El segundo factor en la formación del suelo son los organismos (Bridges, 2024). Estos incluyen una amplia variedad de seres vivos, desde bacterias y hongos hasta organismos de mayor tamaño. Todos ellos, en conjunto, contribuyen activamente a los procesos de transformación y desarrollo del suelo.
- El tercer factor es la topografía, pues no es lo mismo un terreno completamente plano que uno con pendientes pronunciadas o relieves abruptos; la configuración del paisaje influye en la acumulación de agua, la erosión y la distribución de materiales, condicionando así la evolución del suelo (Johnson, 2024).
- El cuarto factor es el material parental, es decir, la roca madre a partir de la cual se origina el suelo (Johnson, 2024).
- El quinto factor es el tiempo (Bridges, 2024). La formación de un suelo puede requerir miles y miles de años. Si bien en algunos casos el proceso puede ser más rápido, lo habitual es que se necesiten largos períodos para que un suelo se desarrolle plenamente. Mientras el clima, los organismos y la topografía actúan sobre la roca madre, fragmentándola y transformándola, el tiempo permite que estos procesos se acumulen y den lugar a un suelo maduro. Precisamente, la dimensión temporal es uno de los aspectos más difíciles de comprender para las personas, pues la vida humana es muy corta en comparación con la escala temporal en que evoluciona el suelo.

Con el transcurso del tiempo, la acción conjunta de los factores formadores; clima, organismos, topografía, material parental y tiempo mismo, da lugar a la creación del suelo. Es importante reiterar cómo se forma el suelo: estos factores interactúan de manera dinámica; el clima y el relieve condicionan los procesos, los organismos aportan materia orgánica y contribuyen a la transformación de los materiales, y todo ello, actuando sobre la roca madre a lo largo de extensos períodos, produce como resultado un tipo de suelo

cuyas características reflejan, en buena medida, las del material generador de ese lugar (Bridges, 2024).

Otro aspecto que conviene mencionar, aunque sin profundizar en él, es el tema de la taxonomía de suelos. La clasificación taxonómica se estructura básicamente en categorías superiores e inferiores. Las categorías superiores comprenden, en orden jerárquico, el orden, suborden, gran grupo y subgrupo. Por debajo de ellas se encuentran las categorías inferiores, que incluyen la familia y la serie. Esta jerarquía permite clasificar y organizar los distintos tipos de suelo de acuerdo con sus propiedades y características, facilitando su estudio y manejo (Nordt, Soil Taxonomy adapted to buried paleosols: First approximation, 2025). A modo de ejemplo, el suelo de la serie Osorno corresponde a un suelo Trumao perteneciente al orden de los Andisoles. Para comprender mejor la diversidad de suelos, es útil conocer algunos de los órdenes taxonómicos existentes y sus características principales.

Los Entisoles son suelos que carecen de horizontes bien desarrollados; se trata de suelos jóvenes que no han tenido tiempo suficiente para evolucionar, o bien de suelos viejos en sentido geológico pero que no han desarrollado horizontes por estar constituidos por materiales resistentes a la meteorización. Los Inceptisoles presentan un perfil algo más evolucionado que los Entisoles, pero su desarrollo es aún incipiente, mostrando evidencias poco significativas de los procesos pedogenéticos. Los Aridisoles son suelos formados en regiones áridas y desérticas. Los Mollisoles se caracterizan por poseer un horizonte superficial fértil, oscurecido por la presencia de materia orgánica. Los Espodosoles presentan horizontes iluviales con acumulaciones significativas de arcillas amorfas, humus y compuestos de aluminio; suelen carecer de estructura definida y, a menudo, están parcialmente cementados. Los Alfisoles muestran un horizonte textural con una cantidad significativa de arcilla illítica, generalmente con un grado moderado a alto de saturación de bases. Los Ultisoles, por su parte, presentan un horizonte B con cantidades significativas de arcillas cristalinas, pero con un bajo grado de saturación de bases. Finalmente, los Oxisoles son suelos fuertemente intemperizados, con un horizonte B constituido principalmente por óxidos de hierro y aluminio y arcillas del tipo 1:1.

Como se ha mencionado, todos estos temas han sido abordados de manera superficial, dado que se trata de una introducción general. No obstante, se recomienda profundizar en cada uno de ellos, especialmente en aspectos como la taxonomía de suelos. Por ejemplo, los Vertisoles son suelos que forman grandes grietas cuando se secan. Los Histosoles, por su parte, son suelos altamente orgánicos. Los Andisoles, son suelos derivados de material volcánico, como cenizas, y presentan un complejo de intercambio dominado por minerales arcillosos de bajo grado de cristalinidad, como los alófanos. Estos minerales confieren al suelo propiedades como alta retención de humedad y baja densidad aparente, además de una gran actividad de aluminio, lo que los convierte en suelos con alta capacidad de fijación de fósforo. La clasificación de paleosuelos, basada en estos mismos principios, permite inferir las condiciones ambientales del pasado bajo el principio del uniformismo (Nordt, Soil Taxonomy adapted to buried paleosols: First approximation, 2025).

Las propiedades físicas del suelo constituyen un aspecto fundamental que debe ser dominado, ya que son datos que deben solicitarse e interpretarse en los análisis de suelo realizados previo a cualquier plantación. Estos valores resultan esenciales para los cálculos agronómicos futuros. La primera y más importante propiedad física, considerada como propiedad primaria, es la textura. La textura del suelo se define como la proporción relativa de las partículas que lo componen, específicamente arena, limo y arcilla. Las arenas son las partículas de mayor tamaño, con diámetros comprendidos aproximadamente entre 0,05 y 2 milímetros. El limo corresponde a las partículas de tamaño intermedio, cuyas dimensiones oscilan entre 0,002 y 0,05 milímetros. Las arcillas son las partículas más pequeñas, con un diámetro inferior a 0,002 milímetros (menos de 2 micras). Es precisamente a escala de las arcillas donde ocurren la mayoría de las reacciones químicas del suelo, lo que confiere a esta fracción una importancia capital en la dinámica edáfica.

De acuerdo con la proporción de estas partículas, los suelos se clasifican en distintas clases texturales. Si predomina la fracción arcilla sobre el limo y la arena, se trata de un suelo arcilloso. Si el limo es la fracción dominante, el suelo se denomina limoso. Cuando la arena supera en proporción a las otras dos fracciones, el suelo es arenoso. Esta

clasificación textural condiciona numerosas propiedades del suelo, como la retención de agua, la aireación, la facilidad de laboreo y la capacidad de intercambio catiónico, entre otras.

El triángulo textural, aunque no se ha incluido en la presentación, es una herramienta ampliamente conocida que permite determinar la clase textural de un suelo a partir de las proporciones de arena, limo y arcilla. Esta propiedad, la textura, puede ser solicitada en cualquier análisis de suelo y resulta de suma importancia en diversos ámbitos agronómicos. Por ejemplo, en el diseño de sistemas de riego, la textura influye en la velocidad de infiltración y la capacidad de retención de agua. Asimismo, al planificar una plantación, la textura condiciona la elección de las especies, ya que algunos frutales se desarrollan mejor en suelos arenosos, mientras que otros prefieren suelos arcillosos o limosos. No obstante, los suelos arcillosos tienden a presentar poros muy pequeños que limitan la aireación y el desarrollo radicular, por lo que las texturas intermedias como las francas, franco-arcillosas o franco-arenosas; suelen ser las más adecuadas para el cultivo de frutales en climas templados.

Otro aspecto fundamental es la estructura del suelo, que se refiere a la forma en que las partículas individuales (arena, limo, arcilla) se agrupan formando agregados. Estos agregados pueden presentar distintas morfologías, dando lugar a estructuras granulares, prismáticas, masivas, laminares, entre otras. La observación de la estructura en el terreno permite evaluar la calidad física del suelo y su comportamiento frente al agua y el aire. Finalmente, la porosidad constituye otra propiedad física relevante, pues determina el espacio poroso disponible para el almacenamiento y movimiento de agua y gases, influyendo directamente en la actividad biológica y el crecimiento de las raíces. Investigaciones recientes en suelos arables han demostrado que la distribución del tamaño de los poros está directamente relacionada con el contenido de carbono orgánico del suelo y la textura, lo que a su vez regula el flujo preferencial de agua y solutos (Fukumasu, 2024).

La densidad real corresponde a la densidad de las partículas sólidas del suelo, considerando su volumen sin incluir los poros. Para determinarla, se toma una muestra de

suelo, se eliminan el agua y el aire, y se pesa el volumen resultante de sólidos. Este valor suele oscilar entre 2,5 y 2,8 gramos por centímetro cúbico, siendo una cifra relativamente constante en la mayoría de los suelos. La densidad que reviste mayor interés agronómico es la densidad aparente. Esta se obtiene tomando una muestra de suelo sin disturbar, es decir, manteniendo su estructura original, colocándola en un volumen conocido, secándola en estufa para eliminar toda el agua y relacionando el peso seco con el volumen ocupado. La densidad aparente se expresa también en gramos por centímetro cúbico, la densidad aparente de los suelos minerales se sitúa entre 0,9 y 1,5 g/cm³. Cuando este valor supera 1,5 g/cm³, indica que el suelo presenta problemas de compactación o endurecimiento, lo que limita la infiltración de agua, la aireación y el crecimiento de las raíces.

Otra propiedad física relevante es el color del suelo. Este se determina mediante la comparación con cartas de color Munsell, un método estandarizado que permite describir el color de manera objetiva y precisa. El color proporciona información sobre la composición del suelo, su contenido de materia orgánica, su régimen de humedad y los procesos de oxidación o reducción que en él ocurren. Finalmente, la profundidad del suelo constituye también una propiedad física de gran importancia, pues condiciona el espacio disponible para el desarrollo de las raíces y la exploración de agua y nutrientes.

En las presentaciones sobre cultivo, se enfatiza constantemente la importancia de la profundidad del suelo, especialmente en el caso de frutales leñosos, que requieren una profundidad mínima de un metro o más para lograr un desarrollo adecuado y una producción óptima. Para cultivos como los cereales, la exigencia de profundidad es menor; con suelos de al menos 40 a 50 centímetros puede ser suficiente para obtener rendimientos aceptables.

Entre las propiedades físicas secundarias del suelo se incluyen la expansión y contracción, la capacidad de arraigamiento que ofrece a las plantas, el drenaje y la dinámica del agua. Esta última resulta fundamental en los estudios de riego, ya que para el diseño hidráulico de un sistema de riego es imprescindible conocer la velocidad de infiltración del agua en el suelo, pues este parámetro condiciona el dimensionamiento y

la operación del sistema. Otra propiedad secundaria relevante es la aireación del suelo, estrechamente vinculada a la porosidad. La presencia de poros es vital para la mayoría de los cultivos, pues las raíces respiran y necesitan oxígeno para crecer. En ausencia de oxígeno, las raíces dejan de crecer, se tornan negras y mueren; en cambio, una raíz sana se presenta de color blanquecino y aspecto brillante.

Otro aspecto relevante dentro de las propiedades físicas secundarias del suelo es la temperatura. El desarrollo de las raíces está condicionado por la temperatura del suelo; si este se encuentra demasiado frío, el crecimiento radicular se ve inhibido. El umbral térmico necesario varía según la especie vegetal, pero de manera general, las raíces comienzan a desarrollarse cuando la temperatura del suelo supera los 5 a 8 grados Celsius. Para un crecimiento normal, en muchos casos se requieren temperaturas superiores a los 12 o 15 grados. Asimismo, la capacidad de soporte del suelo constituye otra propiedad física secundaria de interés. Esta se refiere a la aptitud del suelo para sostener la planta y permitir un adecuado anclaje del sistema radicular, aspecto que debe considerarse al momento de establecer plantaciones o siembras.

Se había mencionado que las arcillas son las partículas más pequeñas, con un diámetro inferior a 2 micras. Es precisamente a este nivel microscópico donde ocurren las reacciones químicas que permiten la alimentación de las plantas. A medida que las partículas disminuyen de tamaño, la fuerza de gravedad ejerce una influencia menor sobre ellas. En el mundo microscópico, las leyes físicas que rigen la vida cotidiana comienzan a modificarse. Cuando se alcanza el nivel de las partículas atómicas, los cambios son tales que se requiere una rama especializada de la física, conocida como física cuántica, para estudiar su comportamiento. Esta disciplina aborda las leyes y teorías que explican los fenómenos a escalas tan reducidas, donde las reglas de la física clásica ya no son suficientes.

Los coloides, se definen como la unión entre una fase dispersa y una fase dispersante. En el caso del suelo, la fase dispersante corresponde al agua y la fase dispersa a las partículas minúsculas, como las arcillas. La interacción entre el agua y la arcilla a nivel microscópico da lugar a la formación de coloides. Existen numerosos ejemplos de

coloides en la vida cotidiana, como la leche o la sangre, que presentan este mismo comportamiento. El coloide constituye, por tanto, un estado particular de la materia (Yousuf, 2025). La importancia de los coloides en el suelo radica en que es a este nivel donde se produce el intercambio catiónico y, consecuentemente, la absorción de nutrientes por las plantas. Los coloides representan la fracción activa del suelo y muchas de las propiedades edáficas están íntimamente ligadas a ellos (Tadayonnejad, 2024). Están compuestos por una fase dispersa y una fase dispersante, y es en este complejo donde las plantas obtienen los elementos esenciales para su nutrición.

Los coloides del suelo pueden clasificarse en dos grandes grupos: orgánicos e inorgánicos. Los coloides orgánicos corresponden a la fracción humificada de la materia orgánica; las partículas de materia orgánica, al interactuar con el agua, forman coloides que también constituyen una fuente de nutrientes para las plantas. Los coloides inorgánicos, por su parte, son los más comunes y están conformados por arcillas cristalinas y geles de aluminio y silicio. Ambos tipos de coloides desempeñan un papel fundamental en la dinámica química y física del suelo (Tadayonnejad, 2024).

En el caso particular de los Andisoles, los coloides inorgánicos están representados por minerales como el alófono y la imogolita, así como por óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio. Para comprender la dinámica de la absorción de nutrientes, se puede considerar la siguiente representación: la raíz, provista de sus pelos radiculares; estructuras de tamaño diminuto, se encuentra inmersa en el medio coloidal. En este coloide, las partículas se hallan en un estado coloidal propiamente dicho, lo que significa que, al estar en contacto con el agua, se disocian y liberan iones individuales. Estos iones, como calcio, magnesio, potasio, aluminio, hidrógeno, sodio y otros, quedan como cationes flotando en la solución coloidal.

Es en este entorno donde los pelos radiculares entran en contacto con la fase coloidal y se produce la absorción de nutrientes mediante procesos de difusión, los cuales pueden requerir o no un gasto energético por parte de la planta. A través de este mecanismo, los iones que logran contactar con el pelo radicular ingresan a la raíz. Todo este proceso ocurre a una escala microscópica del orden de mil veces más pequeña que

un milímetro. Un aspecto fundamental es que estos cationes pueden adherirse a las partículas de arcilla del suelo. Esta adhesión es posible porque las partículas de arcilla poseen, en su mayoría, carga eléctrica negativa, mientras que los cationes tienen carga positiva, generándose una atracción electrostática que los retiene (Tadayonnejad, 2024). Este fenómeno es crucial para la fertilidad del suelo, ya que permite retener los nutrientes en la proximidad de las raíces. La liberación de estos nutrientes para ser absorbidos ocurre cuando hay presencia de agua, lo que pone de relieve la importancia del agua como vehículo y medio de intercambio en la nutrición vegetal.

Cuando se riega el suelo, se forma una película de coloides en la cual los cationes retenidos comienzan a liberarse y quedan disponibles en la solución. Es en ese momento cuando los pelos radiculares de las plantas entran en contacto con estos iones y proceden a absorberlos. De esta manera, la planta incorpora los elementos esenciales para su crecimiento y desarrollo. Este proceso constituye el principio básico de la nutrición vegetal. A partir de la dinámica de los coloides, se derivan las propiedades químicas del suelo. Estas propiedades pueden ser determinadas mediante análisis de laboratorio, razón por la cual el análisis de suelo constituye una herramienta fundamental en la gestión agronómica. A través de él es posible obtener información tanto de las propiedades físicas como de una amplia gama de propiedades químicas. Entre los datos que proporciona se encuentran las cantidades de nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, azufre, hierro y otros elementos presentes en el suelo. Con base en estos resultados, es posible diseñar estrategias de fertilización más precisas y ajustadas a los requerimientos de la especie cultivada, optimizando así la nutrición de los cultivos y la eficiencia en el uso de insumos.

Entre las propiedades químicas del suelo más relevantes se encuentra, en primer lugar, la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Esta propiedad se refiere a la capacidad que tienen las partículas más pequeñas del suelo, principalmente las arcillas y la materia orgánica, para retener y liberar elementos químicos en forma iónica. Como se ilustró anteriormente, cationes como calcio, magnesio, potasio, sodio, aluminio e hidrógeno pueden adherirse a las superficies de estas partículas gracias a su carga positiva, quedando disponibles para ser intercambiados y absorbidos por las plantas. Los cationes

de cambio más importantes desde el punto de vista de la fertilidad son el calcio, el magnesio, el sodio y el potasio, los cuales se conocen como bases de cambio y son determinados en los análisis de suelo mediante la sumatoria de bases. La CIC de un suelo depende directamente de la cantidad y tipo de coloides presentes; por ejemplo, la materia orgánica (humus) puede tener una CIC de 100 a 300 cmol(+)/kg, mientras que la caolinita (una arcilla) tiene una CIC mucho menor, de 3 a 15 cmol(+)/kg (Tadayonnejad, 2024).

Otra propiedad química fundamental es el poder tampón del suelo, que se define como la capacidad que tiene el suelo para resistir cambios en la disponibilidad de nutrientes o en su reacción frente a la aplicación de fertilizantes. Un ejemplo ilustrativo de esta propiedad se observa en Chile: los suelos del norte presentan una baja capacidad tampón respecto al fósforo, lo que significa que con aplicaciones moderadas de este nutriente se logra una buena disponibilidad para las plantas. En cambio, los suelos Trumaos del sur de Chile poseen una alta capacidad tampón, por lo que requieren aplicaciones de fósforo hasta dos o tres veces mayores para obtener los mismos resultados productivos. Esta propiedad condiciona directamente las dosis de fertilización y la eficiencia de los insumos.

El pH del suelo constituye otra propiedad química de gran importancia. El pH influye decisivamente en la disponibilidad de los nutrientes: cuando el suelo se vuelve alcalino, muchos elementos esenciales disminuyen su solubilidad y, por tanto, su disponibilidad para las plantas, lo que redundaría en una pérdida de fertilidad. De manera similar, cuando el suelo se torna excesivamente ácido, también se reduce la disponibilidad de nutrientes y pueden aparecer toxicidades por elementos como el aluminio. Por lo tanto, tanto la acidez como la alcalinidad extrema afectan negativamente la fertilidad del suelo y el desarrollo de los cultivos.

A modo de ejemplo, muchos frutales presentan dificultades cuando el pH del suelo desciende por debajo de 5,5. En estos casos, no necesariamente mueren, pero su producción comienza a disminuir de manera significativa. Situación similar ocurre cuando el pH supera valores de 7 o 7,5, donde también se observa un descenso en los rendimientos. Uno de los problemas más comunes asociados a pH elevados es la clorosis

férrica, una deficiencia de hierro inducida por la baja disponibilidad de este elemento en condiciones alcalinas.

Otro aspecto relevante es la acumulación de sales en el suelo. En regiones con precipitaciones abundantes, como en la zona donde se desarrolla esta explicación, la lluvia es suficiente para lavar las sales, por lo que este problema no se presenta. Sin embargo, en la gama de suelos del norte de Chile, aproximadamente desde Santiago hacia el norte, la acumulación de sales constituye un problema frecuente y de gran importancia. Este tema será abordado con mayor profundidad en un video dedicado al riego, ya que en condiciones de salinidad es necesario aplicar volúmenes de agua superiores a los requerimientos del cultivo para lograr el lavado de sales y mantener condiciones adecuadas en el suelo.

En cuanto a las propiedades biológicas del suelo, es fundamental considerar que el suelo fértil constituye un ente biológico cuyos procesos orgánicos condicionan en gran medida el desarrollo de los vegetales. El suelo actúa como un purificador de la materia y favorece la vida, albergando una enorme cantidad de bacterias, hongos y otros microorganismos. Además, el suelo cumple una función esencial en el reciclaje de la materia orgánica: hojas, animales muertos y cualquier resto orgánico que cae sobre él es descompuesto y transformado por la actividad de los microorganismos, tanto muertos como vivos, así como por la fauna del suelo. Este proceso de reciclaje es fundamental para mantener la fertilidad y la salud del sistema edáfico.

En el suelo, la materia orgánica se descompone y se mineraliza, es decir, se transforma liberando los elementos minerales que contiene. Por ejemplo, los huesos de animales muertos aportan fósforo y calcio; las hojas, al descomponerse, liberan magnesio proveniente de la clorofila. Estos elementos mineralizados quedan disponibles en el suelo para ser absorbidos por las siguientes generaciones de plantas. Asimismo, la materia orgánica se modifica y mineraliza liberando elementos químicos esenciales como el nitrógeno, que pasa a formas asimilables.

Dentro del suelo se establecen también asociaciones simbióticas entre plantas y hongos, como las micorrizas. Prácticamente todas las raíces de las plantas vasculares están

asociadas a algún tipo de micorriza. En esta relación mutualista, el hongo obtiene carbohidratos de la planta y, a cambio, facilita la absorción de agua y nutrientes minerales, mejorando la nutrición y la resiliencia del vegetal.

En cuanto al agua en el sistema suelo-planta-atmósfera, los procesos fisiológicos que determinan la producción vegetal dependen en gran medida de la transpiración. El agua es absorbida por las raíces, asciende a través del xilema, llega a las hojas y se evapora hacia la atmósfera. Este flujo continuo se sostiene gracias al sistema vascular de la planta, que, aunque carece de un corazón como los animales, mantiene un movimiento constante de líquido desde el suelo hasta el aire. Este transporte es esencial para la nutrición, el enfriamiento y el mantenimiento de los procesos vitales. Cabe destacar que solo alrededor del 1% del agua absorbida es utilizada realmente para el crecimiento y la formación de tejidos; el 99% restante se emplea en funciones de transporte, regulación térmica y sostenimiento de la actividad metabólica.

Desde la perspectiva agronómica, el comportamiento del agua en el suelo se describe mediante conceptos clave. Cuando el suelo está completamente lleno de agua, se dice que está en saturación. A medida que el agua drena por gravedad, el suelo alcanza un contenido de humedad denominado capacidad de campo, que representa la máxima retención de agua que el suelo puede sostener contra la gravedad. Si la pérdida de agua continúa hasta un nivel en que las plantas no pueden extraerla y se marchitan irreversiblemente, se alcanza el punto de marchitez permanente (Tadayonnejad, 2024). Estos umbrales son fundamentales para el manejo del riego y la comprensión de la disponibilidad hídrica para los cultivos.

La velocidad de infiltración del agua en el suelo es un parámetro que puede medirse de manera práctica, por ejemplo, colocando tierra en un recipiente con un orificio en la base, agregando agua y cronometrando el tiempo que tarda en perderse o salir por el fondo. Este valor resulta esencial cuando se requiere realizar un diseño hidráulico para riego en predios agrícolas. En los análisis de suelo, los laboratorios especializados suelen proporcionar, junto con otras propiedades, datos fundamentales como la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente, la densidad aparente, la profundidad radicular

del cultivo y la evapotranspiración máxima del cultivo de interés. Además, la eficiencia de aplicación del riego dependerá del sistema utilizado: riego por surcos, riego por goteo, riego presurizado, entre otros.

Para concluir esta exposición rápida sobre los aspectos más relevantes que deben tenerse presentes en el ámbito de la edafología aplicada a la agricultura, se presentan finalmente algunos criterios que permiten evaluar el suelo y su manejo. Estos criterios constituyen herramientas útiles para que el profesional pueda diagnosticar y tomar decisiones fundamentadas en el manejo de los suelos y del agua en los sistemas productivos.

Para determinar la capacidad de uso del suelo, es decir, la evaluación de su aptitud para fines agrícolas, se deben considerar diversos criterios técnicos. Entre los principales se encuentran la profundidad efectiva, la textura, la cantidad de piedras, la profundidad aprovechable, la permeabilidad, la pendiente, la susceptibilidad a la erosión, el drenaje, el riesgo de inundación, la salinidad, los días libres de heladas, la adaptación a cultivos y la intensidad de uso. Estos criterios permiten clasificar el suelo en distintas categorías según su potencial productivo.

Por ejemplo, los suelos de clase I, considerados los de mejor capacidad para uso agrícola, se caracterizan por ser profundos, de textura franca, con presencia de piedras no superior al 5-10%, una profundidad aprovechable de al menos 80 a 100 centímetros, permeabilidad moderada, pendiente inferior al 2%, sin susceptibilidad a la erosión, buen drenaje, nula inundación, ausencia de salinidad, más de 50 días libres de heladas y buena adaptación a cultivos, lo que permite un uso muy intensivo. En el extremo opuesto, los suelos de clase VIII carecen de valor agrícola. Entre ambos extremos, los suelos de clase IV, por ejemplo, pueden ser delgados, con textura variable, más de un 35% de piedras, profundidad aprovechable reducida, pendientes cercanas al 20% y otras limitaciones que dificultan su manejo con maquinaria.

Las clases de capacidad de uso más aptas para la agricultura suelen ser la I, II y III. No obstante, mediante enmiendas y prácticas de manejo adecuadas, es posible transformar suelos de menor clase, como los de clase VII, para el cultivo de especies adaptadas. Un ejemplo de ello se observa en Chile, donde en suelos de clase IV, V e

incluso VII, ubicados en laderas de cerros, se han establecido exitosamente plantaciones de paltos. Finalmente, se presenta una tabla resumen con los criterios mencionados para facilitar la evaluación de la capacidad de uso del suelo.

3.4. Requerimientos Nutrimientales del Maíz

El maíz como cualquier otro ser vivo tiene necesidades nutrimentales específicas las cuales están basadas en macronutrientes primarios, secundarios y micronutrientes. Lo cual es una tarea fundamental el entenderlos para diseñar estrategias de fertilización adecuadas, ya que la acumulación y partición de nutrientes en la planta varía a lo largo del ciclo fenológico y está influenciada por factores de manejo como la densidad de población y la dosis de nitrógeno, así como por la genética del híbrido. La alta densidad de plantas eleva el rendimiento, pero reduce la concentración de NPK en grano por dilución. Al igual que la fecha de siembra es otro punto importante para considerar ya que las heladas tempranas interrumpen la remobilización de nitrógeno (Djaman, 2024). También el tipo de suelo puede afectar los requerimientos, la cantidad de nitrógeno en siembra, la fecha en que se aplican los nutrientes.

Entre los macronutrientes primarios se encuentra el nitrógeno, fósforo y potasio (NPK, por sus siglas en inglés). Entre los macronutrientes secundarios se puede encontrar el calcio, magnesio y azufre. Y, por último, pero no menos importante se encuentran los micronutrientes que en ocasiones no son tomados con la importancia necesaria, entre los micronutrientes se encuentra el zinc, boro, manganeso.

(Ignacio A. Ciampitti, 2013) evaluaron la acumulación y partición de fósforo (P), potasio (K) y azufre (S) en maíz bajo tres densidades de población (54,000, 79,000 y 104,000 plantas ha⁻¹) y tres dosis de nitrógeno (0, 112 y 224 kg N ha⁻¹). Los resultados mostraron que el contenido de nutrientes a la madurez respondió predominantemente a la dosis de nitrógeno, mientras que la densidad de población tuvo un efecto menor. La acumulación de nutrientes en la etapa vegetativa, expresada como porcentaje del total a

la madurez, varió según el elemento: para fósforo fue del 47%, para azufre del 58%, mientras que el potasio alcanzó su máximo en la etapa R3 (grano lechoso), con una acumulación del 100% en ese punto, disminuyendo hacia la madurez (Ignacio A. Ciampitti, 2013).

La tasa máxima de absorción de fósforo ocurrió alrededor de la floración ($4.1 \text{ mg m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$), mientras que la de potasio fue máxima entre los estadios V5 y V15 ($41.5 \text{ mg m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$). El azufre mostró un patrón similar al fósforo, con la mayor tasa de absorción en el período que rodea a la floración ($1.7 \text{ mg m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$). En términos de contenido total a la madurez, los valores promedio fueron 4.6 g m^{-2} para fósforo, 18 g m^{-2} para potasio y 1.7 g m^{-2} para azufre, con un rendimiento de grano promedio de 10 Mg ha^{-1} (Ignacio A. Ciampitti, 2013).

En cuanto a la partición entre órganos, durante la fase vegetativa el cociente hoja/tallo para fósforo disminuyó de 1.8 en etapas tempranas a 0.8 en floración, mientras que para potasio el cociente pasó de 1.7 a 0.5 en el mismo período. Para azufre, la hoja mantuvo un contenido superior al tallo durante toda la fase vegetativa, con un cociente que disminuyó de 3.5 a 1.7 hacia la floración. Durante la fase reproductiva, el contenido de nutrientes en la mazorca respondió positivamente al aumento de nitrógeno, mientras que la densidad de población mostró un efecto inverso, asociado a la reducción del tamaño de la mazorca bajo alta densidad (Ignacio A. Ciampitti, 2013).

Los índices de cosecha para macronutrientes fueron 0.78 para fósforo, 0.29 para potasio y 0.63 para azufre. La eficiencia interna de uso de nutrientes (relación rendimiento de grano/contenido total en planta) mostró valores promedio de 224 kg kg^{-1} para fósforo, 57.6 kg kg^{-1} para potasio y 613 kg kg^{-1} para azufre, con incrementos significativos al aumentar la dosis de nitrógeno y disminuir la densidad de población (Ignacio A. Ciampitti, 2013).

En un estudio complementario, Ciampitti y Vyn (2013b) evaluaron la acumulación y partición de calcio (Ca), magnesio (Mg) y micronutrientes (hierro, zinc, manganeso, cobre) bajo las mismas condiciones experimentales. La acumulación total a la madurez promedió 2.8 g m^{-2} para calcio, 3.3 g m^{-2} para magnesio, 0.17 g m^{-2} para

hierro, 0.05 g m^{-2} para zinc, 0.05 g m^{-2} para manganeso y 0.008 g m^{-2} para cobre. El porcentaje de acumulación en la etapa vegetativa varió según el nutriente: calcio 91%, magnesio 73%, manganeso 73%, cobre 73%, hierro 51% y zinc 47% (Ciampitti, 2013).

La tasa de absorción de magnesio, manganeso y cobre siguió patrones similares al nitrógeno, mientras que la de hierro y zinc mostró una mayor demanda durante la etapa reproductiva. En particular, el 50% del hierro y zinc total se acumuló después de la floración, lo que sugiere que las aplicaciones foliares durante las etapas reproductivas podrían ser más efectivas para estos elementos. El calcio mostró una acumulación predominantemente vegetativa, con el 91% del total a la madurez ya acumulado al momento de la floración (Ciampitti, 2013).

En cuanto a la partición entre órganos, se identificaron tres patrones distintos durante la fase vegetativa: (i) mayor asignación al tallo para magnesio y zinc; (ii) mayor asignación a la hoja para hierro y calcio; y (iii) partición isométrica (equitativa) para manganeso y cobre. Durante la fase reproductiva, la partición de nutrientes hacia la mazorca siguió el orden $P > S > N > K$, mientras que para micronutrientes se observó que el zinc mostró la mayor capacidad de remobilización desde el tallo hacia el grano (Ciampitti, 2013).

Los índices de cosecha para micronutrientes fueron: calcio 0.05, magnesio 0.44, zinc 0.52, manganeso 0.17, hierro 0.14 y cobre 0.32. Estos valores indican que mientras el zinc es altamente translocado al grano, el calcio permanece mayormente en los tejidos vegetativos. La eficiencia interna de uso de nutrientes varió con el manejo, mejorando con mayores dosis de nitrógeno y disminuyendo con el aumento de la densidad de población (Ciampitti, 2013).

(Borges, 2009) evaluaron la acumulación de boro (B), cobre (Cu), manganeso (Mn) y zinc (Zn) en dos híbridos de maíz de cruza simple (GNZ2004 y P30F33) a lo largo de once etapas fenológicas, desde la emergencia hasta la madurez fisiológica, bajo una densidad de $60,000 \text{ plantas ha}^{-1}$ y manejo para rendimientos superiores a 12 t ha^{-1} . Los resultados mostraron que la acumulación de micronutrientes fue prácticamente nula hasta los 29 días después de la emergencia, con valores máximos alcanzados después de los 100

días, durante la segunda mitad del llenado de grano. La acumulación total siguió el orden $Zn > Mn > Cu > B$, con valores promedio de 2.05 kg ha⁻¹ de zinc, 0.70 kg ha⁻¹ de manganeso, 0.30 kg ha⁻¹ de cobre y 0.13 kg ha⁻¹ de boro (Borges, 2009).

Para el boro, ambos híbridos mostraron una acumulación cuadrática, con máximos a los 102 días después de la emergencia (0.16 kg ha⁻¹ en GNZ2004 y 0.10 kg ha⁻¹ en P30F33). El zinc también presentó comportamiento cuadrático, con máximos en madurez fisiológica (2.63 kg ha⁻¹ para GNZ2004 y 1.47 kg ha⁻¹ para P30F33). El manganeso mostró acumulación lineal, con un pico de absorción al inicio del llenado de grano (85 días) y valores máximos de 0.77 y 0.65 kg ha⁻¹ para los dos híbridos. El cobre presentó un comportamiento lineal, con el mayor incremento después de los 125 días, alcanzando máximos de 0.31 y 0.29 kg ha⁻¹ (Borges, 2009).

Los autores calcularon las cantidades de micronutrientes necesarias para producir una tonelada de grano de maíz: 0.0009 kg de boro, 0.019 a 0.020 kg de cobre, 0.042 a 0.046 kg de manganeso y 0.100 a 0.194 kg de zinc. Estos valores son superiores a los reportados en estudios previos con híbridos antiguos, lo que evidencia la necesidad de actualizar las recomendaciones de fertilización para materiales genéticos modernos. Además, se observó variabilidad genética en la capacidad de absorción, con el híbrido GNZ2004 mostrando mayor acumulación de zinc y boro en las etapas finales, lo que sugiere que la selección genética puede contribuir a mejorar la eficiencia de uso de micronutrientes (Borges, 2009). La integración de estos estudios permite establecer recomendaciones clave para el manejo nutricional del maíz. En primer lugar, las etapas críticas de demanda para la mayoría de los nutrientes ocurren alrededor de la floración y durante el llenado de grano, particularmente entre los estadios V15 y R3. Para micronutrientes como zinc y cobre, la máxima demanda se extiende hasta la madurez fisiológica, lo que sugiere que las aplicaciones tardías pueden ser beneficiosas (Borges, 2009).

En segundo lugar, la densidad de población y la dosis de nitrógeno influyen significativamente en la acumulación total de nutrientes, aunque con efectos diferenciales según el elemento. La respuesta positiva a mayores dosis de nitrógeno es consistente para

todos los nutrientes, mientras que el incremento en la densidad de población tiende a reducir la acumulación por planta, pero puede aumentar la acumulación por área debido a mayor número de plantas (Ignacio A. Ciampitti, 2013).

En tercer lugar, la partición de nutrientes entre órganos está modulada genéticamente, con índices de cosecha que varían desde 0.05 para calcio hasta 0.78 para fósforo. Esta información es fundamental para estimar la remoción de nutrientes por la cosecha y planificar la reposición en el suelo (Ciampitti, 2013).

Finalmente, la variabilidad genética observada en la acumulación de micronutrientes (Borges, 2009) sugiere que el mejoramiento genético puede contribuir a desarrollar híbridos más eficientes en la absorción y utilización de nutrientes, lo que representa una oportunidad para reducir la dependencia de fertilizantes y mejorar la sostenibilidad de los sistemas de producción.

3.5. Microorganismos del Suelo

Actualmente la tierra se trabaja como una materia inerte, sin vida, solo considerando las propiedades físicas y químicas. Ignorando que en la tierra se encuentran millones de microorganismos. La diversidad microbiana del suelo es fundamental para mantener la productividad agrícola, ya que microorganismos como bacterias y hongos son actores clave en funciones esenciales como el ciclo de nutrientes, la descomposición de materia orgánica y la supresión de enfermedades (Van Der Heijden, 2008). Estos microorganismos hacen que se mueva el metabolismo de las plantas. Cuando el microbioma empieza a degradarse empieza a surgir el problema de malezas y una función a través de las micorrizas de comunicación. Se estima que más del 70% de los nematodos del suelo son considerados beneficiosos. Los microorganismos tienen una función muy importante para la salud y productividad de los suelos, habiendo microorganismos que viven en el PH, otros disponen nutrientes y humedad disponible para las plantas, y hay algunos que combaten y previenen plagas y enfermedades (Jacoby, 2017).

También existe una interrelación entre estos microorganismos ya que, así como en la superficie existe una red trófica o cadena alimenticia, en el suelo existe una igual, en la que algunos microorganismos dependen de otros y de determinadas condiciones. El concepto de la cadena alimenticia del suelo es un tema muy importante, ya que confirma que se trabaja con un sistema vivo. La cadena alimenticia del suelo es una conexión que une a las plantas con todo el microbioma, que son todo el conjunto de microorganismos que habita en el suelo e interrelacionan con las plantas que son un organismo autótrofo, que tienen la capacidad de transformar la energía luminosa proveniente del sol en carbono. Es decir, en energía para todos los organismos que dependen de ese primer eslabón, que es la planta. La planta entonces transforma esta energía luminosa en energía química y se lleva a través de la raíz, particularmente de unos compuestos llamados exudados radiculares. De los exudados radiculares pasa a los primeros eslabones que son bacterias, hongos. Posteriormente se van haciendo más complejos, que son amebas, flagelados, nematodos. Por lo general la cadena alimenticia es invisible a simple vista, aunque hay nematodos o insectos diminutos los cuales pueden ser observados (Lugtenberg, Plant-growth-promoting rhizobacteria. Annual review of microbiology, 2009).

Otro tema que ha cobrado relevancia es la rizosfera, este término fue descrito por primera vez en 1919 por Gilbert. En pocas palabras es un manto fino que cubre la raíz, técnicamente se trata de los 5 mm del suelo que rodean la raíz. Por poner un ejemplo práctico, si se extrae una planta y esta es sacudida, el suelo que queda adherido a la raíz es considerada la rizosfera y Gilbert lo describió como uno de los ecosistemas más dinámicos del suelo, ya que es donde ocurre la interrelación entre la raíz y la planta. Las plantas al ser organismos sésiles requieren acercarse a los nutrientes, acercarse a los recursos y para esto sirven los microorganismos, que al emitir señales a la micorriza forma una simbiosis que atrae el recurso que necesita la planta. También en condiciones de sequía, temperaturas altas o incluso enfermedades se reclutan los microorganismos para que cubran sus necesidades. Entonces la rizosfera es realmente, pues, el área donde ocurre toda la comunicación de la planta con su entorno (Harman, 2006). Estudios recientes demuestran que la rizosfera es el escenario de complejas interacciones ecológicas entre

las plantas y una diversa gama de microorganismos, incluyendo bacterias, hongos, arqueas y virus, que son cada vez más reconocidos como parte integral de la salud, el desarrollo y la resiliencia de las plantas (Philippot, Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere, 013).

Otro tema importante es el ciclo de vida de los microorganismos, porque muchas veces, cuando se inoculan estos microorganismos benéficos al suelo, se piensa que se están abonando los suelos y que quizás sus poblaciones van a ir incrementándose. En algunos casos es así, pero no en todos. Usando de ejemplo uno de los hongos muy utilizado en los ecosistemas agrícolas que es el *Trichoderma*, este hongo por lo general se inocula en los suelos para prevenir la incidencia de enfermedades de pudriciones de la raíz.

En la práctica agrícola convencional, se suele iniciar el ciclo de cultivo con programas de inoculación microbiana. Por ejemplo, se aplica 1 kg de un formulado de *Trichoderma* con una concentración de 1×10^6 UFC/g (un millón de unidades formadoras de colonias por gramo), realizando entre 5 y 6 aplicaciones sucesivas con intervalos de 15 a 20 días. Generalmente, los productores realizan un análisis microbiológico basal del suelo antes de iniciar las aplicaciones, donde se constata la ausencia o niveles mínimos del hongo objetivo. Tras la inoculación, se observan respuestas fisiológicas en la planta que indican la actividad del microorganismo, como mejoras en el desarrollo radicular o incremento en la tolerancia al estrés. Por ejemplo, se ha demostrado que la inoculación con *Trichoderma harzianum* en plántulas de maní mejora la longitud de la raíz y el peso de la planta, aumenta la producción de ácido indol acético (AIA) y reduce los niveles de etileno (Ganesh, 2024). Sin embargo, cuando se cuantifican las poblaciones microbianas después de 4-5 meses mediante análisis edáficos, los resultados no reflejan una suma aritmética de las esporas inoculadas. Es decir, aunque la lógica sugeriría que 6 aplicaciones de 1×10^6 UFC/g deberían resultar en aproximadamente 6×10^6 UFC/g, las concentraciones medidas suelen ser significativamente menores. Esta discrepancia se explica por dos factores principales:

- Colonización de tejido vegetales: Las cepas de *Trichoderma* tienen capacidad de colonizar tejidos vegetales internos (raíces, vasos conductores), translocándose

desde la rizosfera hacia los tejidos de la planta. Por lo tanto, un análisis de suelo subestimaría las poblaciones reales, ya que una proporción significativa del inóculo reside en la endosfera vegetal.

- Dependencia de la actividad radicular: La dinámica poblacional de los microorganismos rizosféricos está directamente correlacionada con la actividad fisiológica de las raíces. Durante las etapas vegetativas tempranas (ejemplo: cultivos de ajo o jitomate), la alta exudación radicular y el crecimiento activo mantienen poblaciones microbianas elevadas. No obstante, durante la fase reproductiva y de maduración, los recursos de la planta se redistribuyen hacia la producción de frutos y semillas, reduciéndose la actividad rizosférica y, consecuentemente, las poblaciones microbianas asociadas (Hinsinger, 2009).

En conclusión, la densidad poblacional de microorganismos benéficos no sigue una acumulación lineal post-inoculación, sino que está sujeta a complejas interacciones planta-microbio-ambiente que determinan su estabilidad ecológica en el sistema suelo-raíz (Lugtenberg, 2009). Lo más importante a reiterar es la actividad depende de la actividad de la raíz. Hay elementos que perjudican el equilibrio de los microorganismos como la fertilización de síntesis química. Al fertilizar con grandes dosis, se logra una planta más fuerte y por ende una raíz más fuerte, pero no desarrollaría una cadena de microorganismos más grandes en el suelo. Si se tiene una planta con una raíz más densa, evidentemente uno asumiría que el primer eslabón está mejor. Pero lo que ocurre muchas veces es que cuando nosotros sobre fertilizamos se empieza a quedar en el suelo, por poner un ejemplo, en el caso del fósforo. Que al utilizar la dosis adecuada estimula el desarrollo radicular de las plantas. Pero cuando se aumenta la dosis de la necesaria se observan respuestas contradictorias desde la perspectiva de la biología del suelo.

Cuando hay un exceso de fertilizante la planta ya no libera tantos exudados radiculares al percibir que sus requerimientos de nutrientes están satisfechos (Hermans, 2006). Al disminuir esta exudación, se interrumpe la comunicación química esencial para la formación de asociaciones benéficas ya que el carbono exudado actúa como moneda de intercambio en la simbiosis planta-microorganismo. Al quedar nutrientes no absorbidos se fijan en el suelo formando compuestos insolubles, generando un círculo vicioso de

dependencia de fertilizantes y reduciendo la biodiversidad microbiana. Otro aspecto fundamental es que algunos suelos son manejados extensivamente. Cuando hay un monocultivo que por años se está produciendo, maíz sobre maíz, inclusive a veces hasta 2 ciclos por año se ocasiona que el fertilizante que la planta no utiliza, que estuvo en exceso ejerce un daño colateral sobre el microbioma.

La compactación del suelo y la salinización constituyen dos procesos de degradación antrópica que alteran profundamente la funcionalidad de los ecosistemas edáficos. La compactación reduce la macroporosidad ($>50\text{ }\mu\text{m}$), limitando la aireación y percolación hídrica, mientras que la salinización incrementa la presión osmótica y genera toxicidad iónica específica (Rengasamy, 2006). El uso prolongado de aguas de riego con alto contenido de sodio y prácticas de fertilización inadecuadas pueden transformar suelos productivos en suelos salino-sódicos. Esta transición modifica fundamentalmente las propiedades fisicoquímicas del suelo, incluyendo la dispersión de arcillas y destrucción de la estructura.

Estas condiciones generan un ambiente hostil para los microorganismos benéficos debido a:

- Estrés osmótico que deshidrata células microbianas
- Reducción de la difusión de oxígeno y sustratos
- Cambios en el potencial redox del suelo
- Competencia iónica en sitios de absorción (BC, 2007).

Aunque exista un sistema radicular desarrollado, la funcionalidad de las redes microbianas se ve comprometida porque:

1. Los exudados radiculares alteran su composición química bajo estrés salino
2. La actividad enzimática microbiana disminuye críticamente por desnaturalización proteica
3. Se reduce la diversidad filogenética de consorcios microbianos especializados.

Por ejemplo, suponiendo que el cultivo de maíz tiene deficiencia de zinc, por lógica hay que incorporar zinc, pero al hacer un análisis complementario del microbioma del suelo se pueden dar cuenta es que ese suelo tiene ausencias de microorganismos. Solubilizando se pone el nutriente en el suelo, y la planta va a asimilar una parte, pero se requiere el microbioma para asimilar el resto de los nutrientes. Entonces esa deficiencia que se está viendo es solamente química y así se ha intentado ponerla en la planta. Pero hay otra deficiencia en el suelo que es la deficiencia biológica, o lo que también la fertilidad se divide en 3, fertilidad física, fertilidad química y la fertilidad biológica. En este sentido el exceso de fertilidad química puede traer consecuencias negativas en el microbioma del suelo.

Generalmente se realizan análisis físico para evaluar qué tipo de suelo es, arcilloso, limosos, o arenoso. Y propiedades químicas para saber contenido de NPK (Nitrógeno, fosforo y potasio) o microelementos para saber cuánto fertilizar. Pero esto nos lleva a analizar la opción de hacer pruebas de orden biológico, estos análisis pueden ser fisicoquímicos del suelo, para determinar estructura, contenido de materia orgánica, PH, conductividad eléctrica. Para complementar se pueden desarrollar análisis microbiológicos, entre los cuales se encuentran los fitopatológicos. La microbiología agrícola estaba muy enfocada en las enfermedades de las plantas que patógeno es. ¿Y posteriormente qué le pongo? ¿Cómo soluciono esta enfermedad? Pero de unos años para acá se empezó a solicitar análisis de fito benéficos y ese análisis se basaba en especies conocidas. Tienes tanta azotobacter, tanta pseudomona, tanto trichoderma, tanto bacillus, etcétera. La importancia de estos microorganismos entra en la cadena alimenticia del suelo, ya que estos hacen que los nutrientes se muevan. Se puede poner nutrientes al suelo mediante fertilizantes, pero si los microorganismos que los desmenuzan para que la planta lo asimile no están presentes, la planta solo asimilara una parte mínima de la cantidad así sean 10 kg o 100 kg. Técnicas avanzadas como la metagenómica, la metatranscriptómica y la metaproteómica están revolucionando nuestra comprensión de las comunidades microbianas del suelo, permitiendo identificar funciones específicas y seguir el destino de los microorganismos inoculados (Jansson, 2018).

Los avances en genómica y técnicas de análisis microbiológico han permitido identificar funciones específicas de los microorganismos del suelo que trascienden su rol tradicional en la nutrición vegetal (Jansson, 2018). Actualmente se reconoce que los microorganismos cumplen cuatro funciones principales en los agroecosistemas: nutrición, protección, descontaminación y regulación del ciclo del carbono. En cuanto a la función nutricional, los microorganismos intervienen en la transformación de nutrientes mediante procesos específicos. Por ejemplo, las bacterias nitrificantes convierten el amonio en nitrato, mientras que los hongos micorrízicos movilizan fósforo insoluble (Richardson, 2011).

3.6. Capacidad de Intercambio Catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) constituye la propiedad fundamental que gobierna el comportamiento químico del suelo. Comprender este concepto permite interpretar y manejar adecuadamente tanto las características químicas como físicas del sistema edáfico. En el ámbito agronómico, la CIC se reporta convencionalmente en los análisis de suelo como un indicador clave de la fertilidad potencial. La CIC es de crucial importancia para la caracterización y clasificación del suelo, así como para la evaluación internacional de la productividad del suelo, la clasificación, el mapeo y la modelización (Kabala, 2024).

Cabe destacar que, aunque existe paralelamente una capacidad de intercambio aniónico, esta última ha recibido considerablemente menos atención científica y práctica. Esta disparidad persiste a pesar de la importancia agronómica de aniones como el fosfato, nitrato, molibdato y cloruro, lo que sugiere que el intercambio aniónico merecería mayor consideración en la investigación edafológica.

La capacidad de intercambio catiónico se define específicamente como la capacidad que presenta un suelo para intercambiar cationes entre la fase sólida y la solución del suelo (Ciesielski, 1997). La CIC puede definirse como la capacidad del suelo para absorber e intercambiar iones positivamente cargados (Shah, 2024). Para visualizar

este concepto, hay que considerar el sistema radical de una planta en contacto con las partículas del suelo. Las superficies de los coloides edáficos, particularmente las arcillas y la materia orgánica, presentan cargas eléctricas negativas y positivas que les permiten retener iones. Es crucial destacar que la materia orgánica exhibe una densidad de carga significativamente mayor que la fracción arcillosa, subrayando su importancia crítica en la fertilidad del suelo.

Desde una perspectiva funcional, la CIC opera como un sistema de almacenamiento de nutrientes. Cuando se aplican fertilizantes al suelo, como en el caso del potasio (K^+), los cationes son retenidos en los sitios de intercambio de los coloides del suelo. Este mecanismo previene pérdidas por lixiviación o precipitación, liberando gradualmente los nutrientes hacia la solución del suelo para su absorción radicular. Así, la CIC representa la capacidad buffer del suelo para mantener la disponibilidad de nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal.

La dinámica de intercambio iónico ocurre entre la fase sólida del suelo y la solución edáfica, que ocupa los microporos del suelo. Este sistema mantiene un equilibrio electroquímico regulado por la teoría de la doble capa difusa, donde las cargas superficiales de los coloides del suelo interactúan con los iones en solución. Se ha demostrado que existe una cantidad significativamente mayor de cationes básicos en los micro agregados en comparación con los macro agregados, lo que se relaciona con un mayor contenido de materia orgánica del suelo y arcilla (Wang, 2017).

Para ilustrar este mecanismo, se puede considerar un escenario donde la solución del suelo contiene 10 iones potasio (K^+) disueltos, mientras que otros 10 iones potasio están adsorbidos en los coloides del suelo. Este equilibrio se mantiene hasta que la planta absorbe un ion de la solución, generando inmediatamente un desbalance eléctrico. Como respuesta, los coloides del suelo liberan iones adsorbidos hacia la solución para restablecer el equilibrio iónico. Este proceso de intercambio catiónico continúa hasta que se agota la reserva de iones intercambiables. El mismo principio opera para los aniones (intercambio aniónico), aunque con menor intensidad debido a las características predominantes de carga en la mayoría de los suelos agrícolas.

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) cuantifica precisamente esta capacidad buffer del suelo, representando un indicador fundamental de su fertilidad potencial. Su valor determina tanto la cantidad como la frecuencia de aplicación de fertilizantes, ya que cada fertilización constituye esencialmente una adición de cargas iónicas al sistema. Cuando la CIC es baja, como sucede en suelos arenosos o con bajo contenido de materia orgánica, los nutrientes añadidos via fertilización son susceptibles a pérdidas por lixiviación durante eventos de lluvia intensa. Por el contrario, suelos con alta CIC (ricos en arcillas y materia orgánica) pueden retener eficientemente estos nutrientes, liberándolos gradualmente para su absorción por las plantas.

La determinación de la CIC se realiza mediante métodos de laboratorio estandarizados que miden la cantidad total de cargas negativas disponibles para el intercambio catiónico. El método más comúnmente utilizado es el de acetato de amonio, sin embargo, este método presenta errores durante la determinación, pudiendo sobreestimar cationes como el calcio entre 10 y 498 veces en relación con los presentes originalmente en los sitios de intercambio (Preciado-Guzmán, 2024). Se han comparado varios métodos para medir la CIC, incluyendo acetato de amonio, acetato de sodio, sumatoria de cationes extraídos con, cloruro de bario y tiourea de plata (Preciado-Guzmán, 2024). Esta medición es fundamental para desarrollar recomendaciones de fertilización precisas y estrategias de manejo nutrimental adecuadas para cada tipo de suelo.

La cuantificación de la CIC se realiza a través de la sumatoria de las cargas positivas de los principales cationes adsorbidos: calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^{+}), sodio (Na^{+}), amonio (NH_4^{+}) y aluminio (Al^{3+}). Es crucial destacar que esta medición se estandariza a pH 7, ya que a este valor de pH las cargas positivas y negativas se encuentran balanceadas, minimizando la interferencia en la determinación de los cationes intercambiables (Preciado-Guzmán, 2024). Esta estandarización asegura la comparabilidad de resultados entre diferentes análisis de suelo. La medición de la CIC presenta consideraciones metodológicas importantes. Si bien la materia orgánica contribuye significativamente a la CIC mediante cargas variables, su medición precisa se ve complicada por la degradación térmica que ocurre durante el secado de las muestras a

105°C. Por esta razón, los valores reportados de CIC reflejan predominantemente la contribución de la fracción arcillosa, que presenta cargas permanentes más estables. Investigaciones comparativas de métodos recomiendan el uso de tiosulfato de plata (AgTU) como una mejor alternativa para determinar la CIC, por ser rápido, de bajo costo, minimizar errores y ser aplicable a suelos con diferentes características de pH, textura, materia orgánica y contenido de carbonatos (Preciado-Guzmán, 2024).

Conceptualmente, la CIC total puede entenderse como la suma de dos componentes:

1. CIC variable: Contribuida principalmente por la materia orgánica, cuya cantidad y carga negativa pueden fluctuar según su estado de descomposición y contenido en el suelo (Abhiram, 2025).
2. CIC permanente: Proveniente fundamentalmente de los minerales arcillosos y caracterizada por su estabilidad en el tiempo.

En términos prácticos, la CIC representa la capacidad de un suelo para retener y liberar gradualmente los cationes añadidos mediante fertilización, previniendo su lixiviación y manteniendo su disponibilidad para las plantas. Esta propiedad es determinante para establecer estrategias eficientes de manejo nutricional y fertilización en sistemas agrícolas.

La estabilidad de la CIC depende críticamente de la proporción entre sus componentes permanente y variable. La CIC permanente, asociada a los minerales arcillosos, ofrece una capacidad de intercambio estable a lo largo del tiempo. Por el contrario, la CIC variable, vinculada a la materia orgánica, está sujeta a fluctuaciones significativas según las condiciones ambientales. En regiones tropicales como Urabá (con alta temperatura y humedad), la rápida descomposición de la materia orgánica conduce a una CIC variable temporalmente elevada pero rápidamente decreciente. En climas fríos (como la Sabana de Bogotá), la menor tasa de descomposición orgánica confiere a la CIC variable una mayor persistencia temporal. Desde una perspectiva gráfica, la CIC total puede representarse como la suma de:

- Una línea constante (CIC permanente) determinada por el contenido de arcilla
- Una línea variable (CIC variable) proporcional al contenido de materia orgánica.

La suma de ambas componentes constituye la CIC total reportada en los análisis de suelo convencionales.

4. METODOLOGÍA

En este capítulo se describen los materiales, insumos, equipos y procedimientos empleados para la elaboración sistema productivo de maíz en el predio Las Cruces, Namiquipa, Chihuahua. La metodología se estructuró en cuatro fases operativas, las cuales integran prácticas de agricultura de precisión, manejo nutrimental por etapa fenológica y análisis estadístico de los resultados.

4.1. Materiales Utilizados

Para el desarrollo del diseño metodológico propuesto se emplearon los siguientes materiales, clasificados según su función dentro del estudio:

4.1.1. Materiales agronómicos

- Fichas técnicas de híbridos de maíz, utilizadas como referencia para el diseño de la metodología.
- Resultados de análisis químicos de suelo del área de estudio, que incluyen pH, materia orgánica, textura y disponibilidad de macro y micronutrientes, empleados como base para el modelado nutrimental.
- Tablas de requerimientos nutrimentales del cultivo de maíz por etapa fenológica, obtenidas de artículos científicos.

4.1.2. Materiales de información y datos

- Datos históricos del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) correspondientes al periodo 2015–2024.

- Registros climatológicos históricos de la región de estudio, utilizados para el análisis de riesgos asociados a temperatura y precipitación.

4.1.3. Materiales tecnológicos y herramientas analíticas

- Software Microsoft Excel para el análisis de datos, modelación de requerimientos nutrimentales y construcción de escenarios técnicos.
- Minitab para el desarrollo de modelos de regresión y análisis de tendencias.
- Sistemas básicos de información geográfica utilizados para la delimitación conceptual del área de estudio y la segmentación por micro lotes.

4.1.4. Materiales metodológicos y de ingeniería industrial

- Diagramas de flujo para la representación del proceso del maíz desde la preparación del suelo hasta la cosecha.
- KPI definidos para la evaluación teórica del rendimiento, eficiencia en el uso de insumos y pérdidas postcosecha.

4.2. Descripción de la Metodología

La siguiente metodología fue desarrollada mediante revisión bibliográfica y análisis técnico. Para su desarrollo se utilizaron distintos materiales, orientados al diseño y estructuración del proceso productivo del maíz.

Fase 1: Planificación y Diagnóstico (Pasos 1-5)

1. Definir metas de rendimiento y rentabilidad.
2. Plan de siembra.

3. Análisis de suelo.
4. Plan de corrección de suelo.
5. Diseño de nutrición integral.

Fase 2: Preparación y Siembra (Pasos 6-11)

6. Selección y tratamiento de semilla
7. Preparación de maquinaria
8. Manejo de residuos postcosecha.
9. Labranza del suelo.
10. Inoculación de la semilla.
11. Siembra de precisión.

Fase 3: Manejo Fenológico Crítico (Pasos 12-14)

12. Control de plagas y enfermedades.
13. Aplicación de nutrición vegetal.
14. Monitoreo permanente en cada fase.

Fase 4: Cosecha y Mejora Continua (Pasos 15-17)

15. Preparación y cosecha de calidad
16. Análisis económico y agronómico
17. Actualización de metas y reinicio

El flujo de trabajo propuesto sigue una secuencia lógica e interconectada entre sus etapas, tal como se ilustra en el diagrama de la Ilustración 3.6.1.

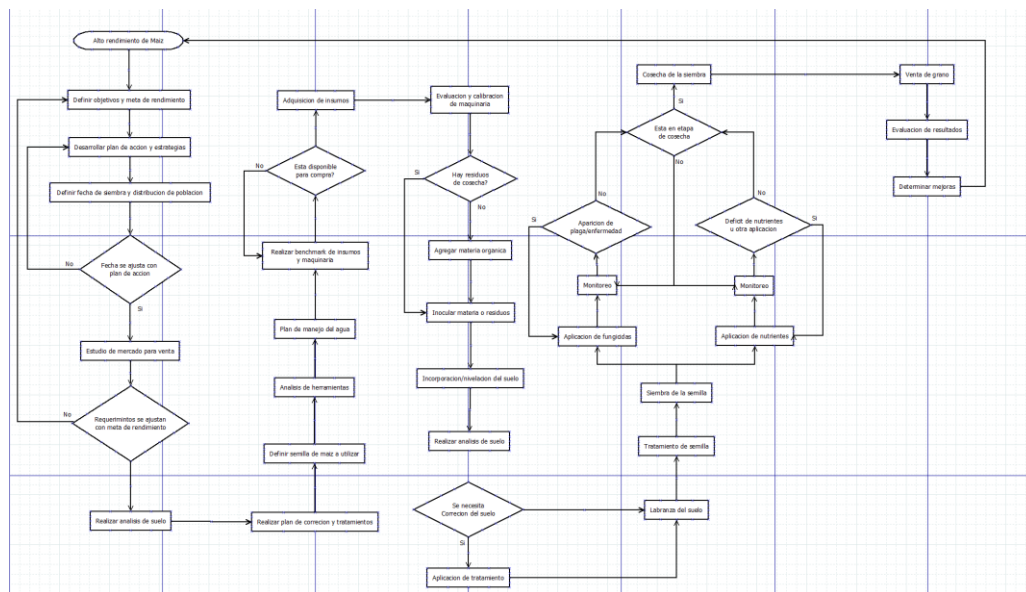


Ilustración 3.6.1 Diagrama del desarrollo de la metodología

4.2.1. Descripción general de la metodología

Esta metodología permite estructurar el proceso del cultivo de maíz, facilitando el análisis y organización de las actividades necesarias para el cumplimiento de los objetivos planteados desde una perspectiva de diseño. En este contexto, la producción agrícola puede analizarse a partir de cuatro funciones fundamentales:

1. Generar alimentos y materia prima en cantidad y calidad.
2. Contribuir al desarrollo económico del productor.
3. Mejorar la capacidad de respuesta ante condiciones adversas.
4. Asegurar el futuro de la biodiversidad y promover un cambio de uso de suelo ambientalmente amigable.

Los primeros cinco pasos corresponden a la planificación y diagnóstico del cultivo, donde se establecen las bases para un proceso de mejora continua. Paralelamente, resulta indispensable identificar las empresas proveedoras de insumos más adecuadas para la producción, así como los servicios clave.

En cuanto a la maquinaria, el diseño metodológico considera el uso de equipos con niveles adecuados de precisión y eficiencia. Como desmenuzadores, subsuelos, gradas rotativas y, fundamentalmente, sembradoras de precisión. El agua, por su parte, constituye el recurso más importante para la agricultura, por lo que se debe disponer de equipos de riego adecuados; en este caso, se opta por el riego de baja presión considerando factores de costo, mantenimiento y eficiencia laboral. Respecto a la nutrición, este insumo representa el factor que más multiplica la producción, por lo que requiere atención prioritaria.

Para la producción del cultivo se tiene que seleccionar la semilla que más se adecue al clima y temporada de la región en la que se trabaje. Su elección se integra como parte del proceso de planeación del ciclo agrícola. Las aplicaciones de herbicidas, fungicidas, insecticidas, productos biológicos, fertilizantes foliares, ácidos orgánicos y aminoácidos se tienen que realizar mediante el método tecnológico alcanzable. En escenarios de mayor tecnificación, se contempla el uso de drones para mejorar la precisión en la aplicación y reducir afectaciones al cultivo.

El diseño metodológico también considera el uso de insumos destinados a mejorar la disponibilidad nutrimental y la eficiencia del sistema, tales como aminoácidos, ácidos orgánicos y compuestos con alta capacidad de intercambio catiónico y aniónico, de acuerdo con especificaciones reportadas en literatura técnica. Asimismo, se consideran formulaciones comerciales de fertilizantes diseñadas para distintas etapas del cultivo, integrando macro y micronutrientes en forma balanceada, junto con compuestos orgánicos que favorecen su absorción.

4.2.2. Desarrollo detallado del proceso

Los primeros diez pasos de la metodología establecen la base del diseño, incluyendo la planeación de objetivos, metas y la identificación de insumos necesarios. A partir de esta base, se estructura el proceso de campo.

- Paso 11: Se plantean sistemas de información y seguimiento para realizar una evaluación del ciclo previo. Esta evaluación comprende no solo el análisis económico y financiero, sino también la identificación de todos los factores que limitaron la producción, las prácticas de manejo realizadas y las limitantes observadas para alcanzar la meta de rendimiento.
- Paso 12: Se realiza un diagnóstico agrícola integral que incluye condiciones climáticas, incidencia de plagas, malezas, prácticas de manejo y características del suelo.
- Paso 13: Se evalúa la operatividad del sistema, incluyendo la disponibilidad y calibración de las maquinas.
- Paso 14: Con base en el diagnóstico y el plan establecido, se formula un plan de construcción de fertilidad del suelo a corto, mediano y largo plazo. Este plan considera las condiciones particulares de la parcela y los objetivos de mejora progresiva de la fertilidad.
- Paso 15: Se define el sistema de manejo de residuos de cosecha y el sistema de labranza más adecuado para las condiciones particulares de cada predio, con el fin de alcanzar la meta de rendimiento y optimizar el uso de los recursos, contribuyendo a la construcción de la fertilidad del suelo.
- Paso 16: Se aborda el manejo eficiente del agua, reconociéndolo como el recurso más importante para la agricultura. Se realizan análisis de agua, estudios de cantidad y distribución del recurso en el predio, para definir la mejor opción de manejo.
- Paso 17: Corresponde a la selección de la semilla y su tratamiento con insecticidas, fungicidas, promotores de germinación, promotores de enraizamiento e inoculantes biológicos, para proceder finalmente a la siembra.
- Paso 18: Se establece el plan de sanidad del cultivo para el manejo integral y preventivo de plagas, malezas y enfermedades.

- Paso 19: Se implementa el programa de nutrición vegetal, entendiendo que la nutrición constituye el factor que más multiplica la producción.
- Paso 20: Se realiza monitoreo continuo en campo, midiendo y evaluando todas las etapas fenológicas y los efectos sobre el cultivo, para identificar las causas que limitan la productividad y la respuesta a las prácticas implementadas.
- Paso 21: Se ejecuta la cosecha con maquinaria calibrada adecuadamente, en el momento oportuno para la entrega y venta del grano.

El siguiente ciclo productivo comienza el día de la cosecha, ya que la forma en que esta se realiza y el manejo de los residuos impactan directamente la productividad del ciclo siguiente. Por esta razón, es indispensable calibrar correctamente la trilladora para lograr:

- Menos del 2% de grano quebrado.
- Menos del 2% de impurezas.
- Cosecha con 16% de humedad.
- Corte lo más bajo posible.
- Distribución uniforme de residuos mediante espaciador y molino.

Una vez finalizada la cosecha y obtenidos los datos precisos de peso de grano y precio de venta, se procede al análisis económico del ciclo concluido. El análisis debe incluir el costo por tonelada producida, rentabilidad lograda, relación beneficio costo, punto de equilibrio, costo por hectárea. Este análisis permite determinar la rentabilidad del ciclo e identificar, desde la perspectiva agronómica, las causas de las mermas y las oportunidades de mejora para ciclos futuros.

5. RESULTADOS

5.1. Fase 1: Planificación y Diagnóstico (Pasos 1-5)

5.1.1. Definir metas de rendimiento y rentabilidad

La meta de rendimiento se definió en 12 toneladas por hectárea. El precio de venta del maíz se estableció en \$5,350 por tonelada, con lo que se busca alcanzar un ingreso de \$64,200 por hectárea. Como meta operativa se determinó lograr una merma de población que no supere el 20% y cosechar 72,000 mazorcas con un peso promedio de 200 gramos, para así cumplir con las 12 toneladas por hectárea.

Para el cumplimiento de estas metas, se han identificado áreas estratégicas que requieren desarrollo. En cuanto a capacidades, se busca fortalecer los recursos humanos, la maquinaria y los equipos. En el ámbito de negocios, se pretende mejorar la integración con empresas proveedoras de servicios e insumos. En materia de sustentabilidad, se busca optimizar continuamente la fertilidad del suelo y el uso eficiente del agua y los recursos disponibles. En gestión de datos, se trabaja en desarrollar y perfeccionar los protocolos del proceso de alto rendimiento, con el fin de parametrizar completamente la metodología y facilitar su transferencia efectiva. La definición clara de estos indicadores proporciona la base para monitorear el progreso y evaluar sistemáticamente los resultados durante el ciclo productivo.

5.1.2. Plan de siembra

La programación de la siembra requiere una planificación meticulosa que considere múltiples variables, tales como las condiciones climáticas, la disponibilidad de equipos, el estado de la labranza y las mejoras realizadas al suelo. Esta decisión estratégica, comparable a una fase de preparación crítica, incluyó todos los ajustes y

calibraciones necesarias para garantizar el éxito operativo, respaldándose siempre en análisis técnicos rigurosos que fundamentan cada aspecto de la implementación.

La fase de siembra exige una preparación detallada y el empleo de los mejores recursos disponibles. Resulta indispensable realizar análisis técnicos precisos que permitan diagnosticar las necesidades específicas del suelo y del cultivo, con el fin de alcanzar las metas de rendimiento establecidas.

El punto de partida para la implementación de la metodología considera la disponibilidad de datos históricos de siembras anteriores. Para este proyecto en particular, se establecerá una línea base inicial, asumiendo la inexistencia de dichos registros previos, con el objetivo de medir la efectividad de las intervenciones propuestas a partir de cero. Este enfoque varía dependiendo de si se trata de la primera siembra o si ya se cuenta con información de ciclos anteriores, ya que después de la cosecha es necesario analizar los problemas presentados y las mermas ocurridas. En el presente proyecto se considerará, a manera de supuesto, que anteriormente no se habían registrado estos datos.

El predio utilizado como referencia se localiza en la localidad de Las Cruces, municipio de Namiquipa, como se observa en la Ilustración 5.1.1.



Ilustración 5.1.1 Imagen satelital del predio estudiado.

5.1.3. Fecha de siembra

La determinación de la fecha de siembra se fundamenta en un análisis probabilístico de series históricas de datos climáticos. Para ello, se consultaron los registros disponibles a partir de 1997 en la base de datos climatológica nacional de la Comisión Nacional del Agua, específicamente de la estación número 8059. Dicha estación se localiza en el municipio de Namiquipa, Chihuahua (Latitud 29.26361111°, longitud -107.4572222°, altitud 2450 msnm), Ilustración 5.1.2.



Ilustración 5.1.2 Imagen satelital de la ubicación de la estación meteorológica.

La estación meteorológica de referencia se localiza a aproximadamente 24.96 kilómetros del terreno de estudio, el cual se sitúa en las coordenadas 29.476091 de latitud, -107.374385 de longitud, manteniendo la misma altitud de 2450 metros sobre el nivel del mar, Ilustración 5.1.3. Esta proximidad espacial y la equivalencia altitudinal entre ambos puntos garantizan la representatividad y confiabilidad de los datos meteorológicos para la zona bajo estudio.

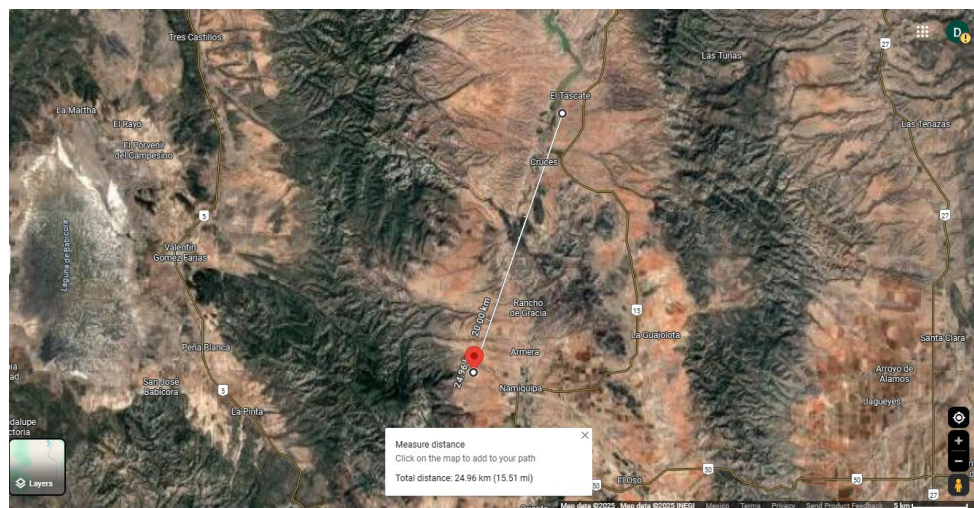


Ilustración 5.1.3 Imagen satelital de la distancia entre la estación meteorológica y el predio.

De la base de datos consultada se obtuvieron registros diarios de precipitación, evaporación y temperaturas máxima y mínima. Como se estableció el rango térmico óptimo para la siembra de maíz se sitúa entre 10°C y 35°C . El presente estudio implementa un procedimiento estadístico para determinar la fecha de siembra que minimiza la probabilidad de exposición a temperaturas $\leq 10^{\circ}\text{C}$ durante el establecimiento del cultivo. La metodología se sustenta en el modelado de la distribución de las fechas históricas de la última ocurrencia de temperaturas mínimas $\leq 10^{\circ}\text{C}$, empleando para ello la distribución normal y su función de distribución acumulativa (CDF).

5.1.4. Recopilación y Análisis de Datos

La fecha óptima de siembra se determinó dentro del modelo mediante análisis estadístico de los registros históricos, observados en la Tabla 5.1.1. Se identificaron las últimas ocurrencias anuales de temperaturas $\leq 10^{\circ}\text{C}$, calculándose el percentil 90 de la distribución acumulativa como umbral de siembra. Este criterio permite estimar un 90% de

probabilidad de ausencia de heladas posteriores, bajo las condiciones analizadas, estableciendo un marco de referencia para la germinación y establecimiento del cultivo.

Tabla 5.1.1 Registro de la primer y última fecha de temperatura menor a 10 grados.

Year	Primer Fecha	Ultima Fecha	Umbral
1997	22/05/1997	08/10/1997	139
1998	25/05/1998	06/10/1998	134
1999	06/05/1999	08/10/1999	155
2000	02/05/2000	08/10/2000	159
2001	07/05/2001	03/10/2001	149
2002	13/05/2002	04/10/2002	144
2003	18/05/2003	23/10/2003	158
2004	14/05/2004	27/09/2004	136
2005	14/05/2005	10/10/2005	149
2006	09/05/2006	16/09/2006	130
2007	27/05/2007	28/09/2007	124
2008	20/05/2008	16/09/2008	119
2009	22/05/2009	23/09/2009	124
2010	16/05/2010	03/10/2010	140
2011	22/05/2011	08/10/2011	139
2012	16/05/2012	16/09/2012	123
2013	22/05/2013	28/09/2013	129
2014	26/05/2014	04/10/2014	131
2015	28/05/2015	28/09/2015	123
2016	03/06/2016	27/09/2016	116
2017	03/06/2017	10/10/2017	129
2018	20/05/2018	10/10/2018	143
2019	30/05/2019	17/10/2019	140
2020	13/05/2020	29/09/2020	139
2021	19/05/2021	01/10/2021	135
2022	06/05/2022	27/09/2022	144
2023	02/06/2023	08/10/2023	128
2024	17/05/2024	08/10/2024	144
2025	10/05/2025		

La fecha óptima de siembra se expresó en días calendario para facilitar el análisis temporal, Tabla 5.1.2.

Tabla 5.1.2 Fecha optima de siembra expresada en días calendarios

Year	Primer Fecha	Dia Inicial
1997	5/22/1997	141
1998	5/25/1998	144
1999	5/6/1999	125
2000	5/2/2000	122
2001	5/7/2001	126
2002	5/13/2002	132
2003	5/18/2003	137
2004	5/14/2004	134
2005	5/14/2005	133
2006	5/9/2006	128
2007	5/27/2007	146
2008	5/20/2008	140
2009	5/22/2009	141
2010	5/16/2010	135
2011	5/22/2011	141
2012	5/16/2012	136
2013	5/22/2013	141
2014	5/26/2014	145
2015	5/28/2015	147
2016	6/3/2016	154
2017	6/3/2017	153
2018	5/20/2018	139
2019	5/30/2019	149
2020	5/13/2020	133
2021	5/19/2021	138
2022	5/6/2022	125
2023	6/2/2023	152
2024	5/17/2024	137
2025	5/10/2025	129

La media aritmética (μ) de las fechas se calculó utilizando la función = *AVERAGE()* de Excel, resultando en un valor de 138.357. Esto representa el umbral promedio en la que se esperaría la última ocurrencia de temperatura $\leq 10^{\circ}\text{C}$. La desviación estándar (σ) muestral se calculó con la función = *STDEV.S()* de Excel, obteniendo un valor de 8.67. Este parámetro mide la variabilidad de las fechas alrededor de la media. Estos valores se utilizan para caracterizar la distribución normal de la variable aleatoria X. Adicionalmente, se realizó un análisis de normalidad mediante un gráfico de probabilidad normal en Minitab, Ilustración 5.1.4, para evaluar el comportamiento distribucional de los datos.

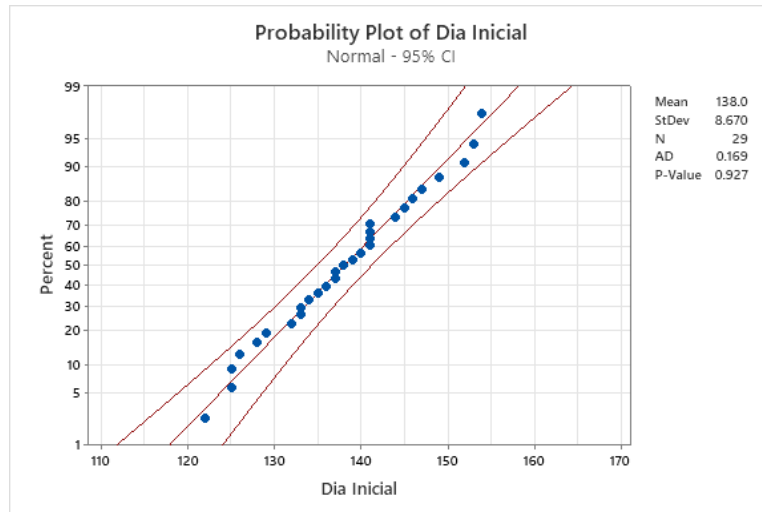


Ilustración 5.1.4 Grafico de probabilidad normal en Minitab.

Función de Distribución Acumulativa (CDF)

La CDF de una distribución normal, denotada como $F(x)$, proporciona la probabilidad de que la variable aleatoria X tome un valor menor o igual a un valor específico X . Es decir:

$$F(x) = P(X \leq x) \quad (5.1.1)$$

En Excel, esta función se implementa con la fórmula

$$NORM.DIST(x, media, desviación\ estándar, VERDADERO) \quad (5.1.2)$$

Cálculo del Riesgo de Helada Posterior a la Siembra

Para determinar el riesgo de que ocurra una temperatura $\leq 10^{\circ}\text{C}$ después de una fecha de siembra X , se utiliza el complemento de la CDF, Tabla 5.1.3. La probabilidad acumulada $F(x)$ representa la probabilidad de que la última helada haya ocurrido en o antes de la fecha X . Por lo tanto, la probabilidad de helada posterior a la siembra (riesgo) se calcula como:

$$R(x) = 1 - F(x) = P(X > x) \quad (5.1.3)$$

- Si $R(x)$ es alto (cerca de 1), el riesgo de helada después de sembrar en la fecha x es alto.
- Si $R(x)$ es bajo (cerca de 0), el riesgo es bajo, lo que indica que la fecha de siembra presenta condiciones más seguras dentro del modelo analizado.

Tabla 5.1.3 CDF como probabilidad de que la última helada haya ocurrido

Día de siembra	Fecha	CDF	1- CDF
128	5/4/2026	11.61%	88.39%
129	5/5/2026	14.03%	85.97%
130	5/6/2026	16.76%	83.24%
131	5/7/2026	19.81%	80.19%
132	5/8/2026	23.17%	76.83%
133	5/9/2026	26.83%	73.17%
134	5/10/2026	30.76%	69.24%
135	5/11/2026	34.93%	65.07%
136	5/12/2026	39.29%	60.71%
137	5/13/2026	43.78%	56.22%
138	5/14/2026	48.36%	51.64%
139	5/15/2026	52.96%	47.04%
140	5/16/2026	57.51%	42.49%
141	5/17/2026	61.97%	38.03%
142	5/18/2026	66.28%	33.72%
143	5/19/2026	70.38%	29.62%
144	5/20/2026	74.24%	25.76%
145	5/21/2026	77.82%	22.18%
146	5/22/2026	81.10%	18.90%
147	5/23/2026	84.06%	15.94%
148	5/24/2026	86.70%	13.30%
149	5/25/2026	89.02%	10.98%
150	5/26/2026	91.03%	8.97%
151	5/27/2026	92.76%	7.24%
152	5/28/2026	94.22%	5.78%
153	5/29/2026	95.44%	4.56%
154	5/30/2026	96.44%	3.56%
155	5/31/2026	97.25%	2.75%
156	6/1/2026	97.91%	2.09%
157	6/2/2026	98.42%	1.58%
158	6/3/2026	98.83%	1.17%
159	6/4/2026	99.14%	0.86%
160	6/5/2026	99.37%	0.63%
161	6/6/2026	99.55%	0.45%
162	6/7/2026	99.68%	0.32%
163	6/8/2026	99.78%	0.22%
164	6/9/2026	99.84%	0.16%

Selección de la Umbral Óptimo de Siembra

La fecha óptima de siembra se selecciona buscando un valor de x donde $R(x)$ sea aceptable según el nivel de riesgo que se esté dispuesto a asumir, ejemplo en la Tabla 5.1.4. Este riesgo es independiente de cada agricultor; sin embargo, dentro del modelo se considera como referencia un percentil del 10%.

Tabla 5.1.4 Percentiles de confianza

Nivel de Riesgo	CDF
Muy Conservador	95%
Conservador	90%
Moderado	80%
Arriesgado	70%
Muy Arriesgado	50%

Tomando en cuenta el 10% el día calendario seleccionado es el 149 (25/05/2026). Con estos valores, se estima con un riesgo moderado de que la fecha optima de siembra es el 25 de mayo del 2026. De igual forma para conocer el umbral real se realizó la misma función CFD para saber la fecha aproximada de la primera helada del año, como se observa en la Tabla 5.1.5, y así poder conocer el umbral con el que se cuenta y poder seleccionar el hibrido que mejor se adapte.

Tabla 5.1.5 Datos históricos de la primera helada del año.

Year	Ultima Fecha	Dia Final
1997	10/8/1997	280
1998	10/6/1998	278
1999	10/8/1999	280
2000	10/8/2000	281
2001	10/3/2001	275
2002	10/4/2002	276
2003	10/23/2003	295
2004	9/27/2004	270
2005	10/10/2005	282
2006	9/16/2006	258
2007	9/28/2007	270
2008	9/16/2008	259
2009	9/23/2009	265
2010	10/3/2010	275
2011	10/8/2011	280
2012	9/16/2012	259
2013	9/28/2013	270
2014	10/4/2014	276
2015	9/28/2015	270
2016	9/27/2016	270
2017	10/10/2017	282
2018	10/10/2018	282
2019	10/17/2019	289
2020	9/29/2020	272
2021	10/1/2021	273
2022	9/27/2022	269
2023	10/8/2023	280
2024	10/8/2024	281

Los parámetros de la distribución normal para la primera ocurrencia de temperatura $\leq 10^{\circ}\text{C}$ se determinaron mediante análisis estadístico. La media aritmética (μ) de 274.9 días y la desviación estándar muestral (σ) de 8.608 días permiten describir la variable aleatoria X , representando la fecha promedio y su dispersión. La evaluación del ajuste a distribución normal se realizó mediante un gráfico de probabilidad normal en Minitab como verificación del comportamiento distribucional, Ilustración 5.1.5.

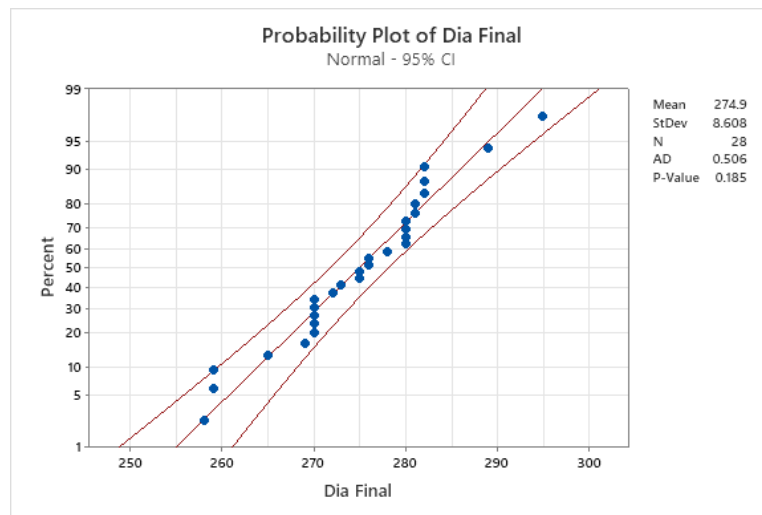


Ilustración 5.1.5 Grafico de probabilidad normal en Minitab.

El cálculo CDF se puede ver en la Tabla 5.1.7Tabla 5.1.6.

Tabla 5.1.6 Primer fecha de helada por año con su respectivo CDF.

Día de siembra	Fecha	CDF	1- CDF
259	9/16/2026	3.24%	96.76%
260	9/17/2026	4.18%	95.82%
261	9/18/2026	5.33%	94.67%
262	9/19/2026	6.71%	93.29%
263	9/20/2026	8.35%	91.65%
264	9/21/2026	10.29%	89.71%
265	9/22/2026	12.52%	87.48%
266	9/23/2026	15.08%	84.92%
267	9/24/2026	17.96%	82.04%
268	9/25/2026	21.16%	78.84%
269	9/26/2026	24.68%	75.32%
270	9/27/2026	28.49%	71.51%
271	9/28/2026	32.56%	67.44%
272	9/29/2026	36.84%	63.16%
273	9/30/2026	41.30%	58.70%
274	10/1/2026	45.87%	54.13%
275	10/2/2026	50.50%	49.50%
276	10/3/2026	55.12%	44.88%
277	10/4/2026	59.67%	40.33%
278	10/5/2026	64.09%	35.91%
279	10/6/2026	68.34%	31.66%
280	10/7/2026	72.35%	27.65%
281	10/8/2026	76.10%	23.90%
282	10/9/2026	79.55%	20.45%
283	10/10/2026	82.69%	17.31%
284	10/11/2026	85.50%	14.50%
285	10/12/2026	87.98%	12.02%
286	10/13/2026	90.15%	9.85%
287	10/14/2026	92.02%	7.98%
288	10/15/2026	93.61%	6.39%
289	10/16/2026	94.94%	5.06%
290	10/17/2026	96.04%	3.96%
291	10/18/2026	96.93%	3.07%
292	10/19/2026	97.66%	2.34%
293	10/20/2026	98.23%	1.77%
294	10/21/2026	98.68%	1.32%
295	10/22/2026	99.03%	0.97%
296	10/23/2026	99.29%	0.71%
297	10/24/2026	99.49%	0.51%
298	10/25/2026	99.64%	0.36%
299	10/26/2026	99.74%	0.26%
300	10/27/2026	99.82%	0.18%
301	10/28/2026	99.88%	0.12%
302	10/29/2026	99.92%	0.08%
303	10/30/2026	99.95%	0.05%
304	10/31/2026	99.96%	0.04%
305	11/1/2026	99.98%	0.02%
306	11/2/2026	99.98%	0.02%

Tomando en cuenta el 10% conservador la primera fecha de helada se estima en el día 264 (9/21/2026). Esto da una brecha de 115 días desde la última helada del año el 25/05/2026 hasta la primera el 9/21/2026. Una vez definida la fecha de siembra y el umbral de la temperatura mínima se calcula de igual forma la distribución de las temperaturas máximas para analizar con que etapa fenológica coincide. Ilustración 5.1.6. La media aritmética (μ) de las fechas presentan un valor de 182.9, mientras que la desviación estándar (σ) es de 37.08, parámetros que describen la variabilidad de las fechas dentro del conjunto analizado.

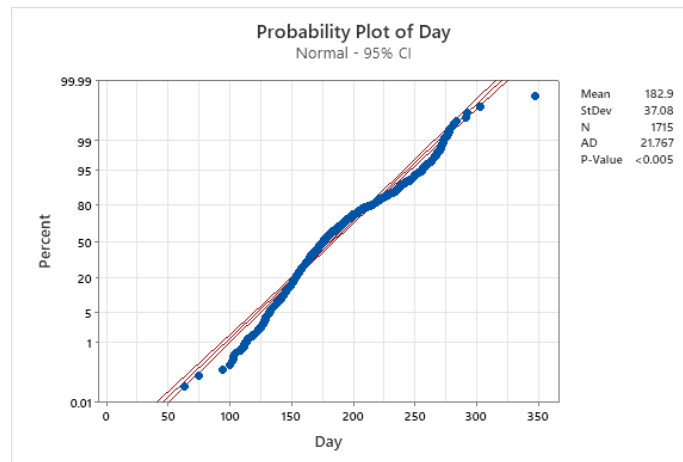


Ilustración 5.1.6 Distribución normal en Minitab del rango de fecha con temperaturas igual o más altas a 35 grados.

Esto indica que entre los días 145 y 220 se concentra la mayor probabilidad de ocurrencia de temperaturas $\geq$ de 35 grados, Tabla 5.1.7. La etapa de floración (VT y R1) es la más susceptible a altas temperaturas, seguida del llenado de grado (R2-R5). Esta fase se presenta aproximadamente entre 50 y 60 días posteriores de la siembra, lo que la ubica entre los días 199 y 209 del año bajo el escenario planteado. Para el día 199, se estima una probabilidad del 33.2% de temperaturas $\geq$ 35 grados, disminuyendo a 24.07% hacia el día 209.

Tabla 5.1.7 CDF de que ocurra una temperatura mayor a 35 grados.

Día de siembra	Fecha	CDF	1- CDF
199	7/14/2026	66.80%	33.20%
200	7/15/2026	67.78%	32.22%
201	7/16/2026	68.74%	31.26%
202	7/17/2026	69.69%	30.31%
203	7/18/2026	70.62%	29.38%
204	7/19/2026	71.54%	28.46%
205	7/20/2026	72.45%	27.55%
206	7/21/2026	73.34%	26.66%
207	7/22/2026	74.22%	25.78%
208	7/23/2026	75.09%	24.91%
209	7/24/2026	75.93%	24.07%

Conclusión de la fecha de siembra

La fecha de siembra se establece dentro del modelo como el 25 de mayo de 2026, con un 90% de nivel de confianza respecto a la ausencia de heladas posteriores. Paralelamente, se define una ventana productiva de 115. Bajo este escenario, el período de floración se proyecta entre los días 199 y 209 días del año, intervalo que coincide con condiciones de alta temperatura ambiental.

El análisis de riesgos climáticos indica una probabilidad estimada del 33.2% de temperaturas $\geq 35^{\circ}\text{C}$ durante esta fase fenológica crítica, condición que puede afectar adversamente los procesos de polinización y el rendimiento. Como alternativa, se plantea un desplazamiento de 10 días en la fecha de siembra, lo que reposicionaría la floración hacia el día 230, reduciendo a probabilidad de estrés térmico a aproximadamente 10.2%. Respecto a la madurez fisiológica (R6), se considera que temperaturas $\leq 10^{\circ}\text{C}$ no afectarían de manera significativa el rendimiento, pudiendo favorecer el secado del grano. Bajo este planteamiento, el ciclo total se ajusta a aproximadamente 130 días.

5.1.5. Selección de semilla

El objetivo de rendimiento establecido para el cultivo es de 12 toneladas por hectárea. Para determinar la densidad de siembra requerida, se realizó una estimación basada en el rendimiento unitario por planta. Tomando como referencia datos agronómicos existentes, una planta de maíz en siembras de alta densidad típicamente puede producir una mazorca, con un peso promedio de 200 gramos. Partiendo de este parámetro, el cálculo para alcanzar 12,000 kg/ha se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Rendimiento} = \text{Cantidad de Mazorcas} * \text{Peso Mazorca} \quad (5.1.4)$$

$$\frac{\text{Rendimiento}}{\text{Peso Mazorca}} = \text{Cantidad de Mazorcas} \quad (5.1.5)$$

$$\frac{12,000 \text{ kg/ha}}{0.2 \text{ kg/ha}} = 60,000 \text{ Mazorcas/ha} \quad (5.1.6)$$

Las 60,000 mazorcas equivalen a 60,000 plantas/ha. A esta cifra se considera un margen de seguridad del 20% para compensar posibles pérdidas por germinación, plagas, enfermedades o factores ambientales, lo que resulta en una densidad de siembra objetivo estimada de:

$$60,000 \text{ semillas/ha} * 1.20 = 72,000 \text{ semillas/ha} \quad (5.1.7)$$

Esta densidad objetivo presenta un potencial estimado de rendimiento de 13.5 toneladas por hectárea, superando la meta planteada y proporcionando un colchón de seguridad ante imprevistos. Para seleccionar el material genético idóneo, se analizaron 22 híbridos de cinco compañías semilleras con presencia en México. Los datos técnicos sobre densidad recomendada, días a cosecha, días a floración y arquitectura de planta fueron obtenidos de los catálogos oficiales de cada empresa. El análisis se realizó contrastando las características de cada híbrido con los criterios agronómicos críticos derivados del estudio climático del proyecto:

1. Ciclo Vegetativo (Días a Cosecha): Se establece como referencia un rango aproximadamente 115-120 días (día calendario 149-154 post-siembra) para aprovechar la ventana libre de heladas de 115 días que culmina el 21 de septiembre.
2. Fecha de Floración: Este es el factor crítico. Se busca que ocurra preferentemente antes del día 199 o después del día 209 del año para evitar la ventana de máximo riesgo de estrés por calor ($\geq 35^{\circ}\text{C}$).
3. Densidad de Población Óptima: Se considera necesario que el material genético sea adaptable a densidades cercanas a las 78,000 semillas/ha.

Tras evaluar los 22 híbridos contra estos criterios, Tabla 5.1.8, se descartó un número significativo por presentar ciclos demasiado largos (>120 días), lo que haría

potencialmente vulnerables a la helada temprana, o por tener densidades de siembra recomendadas muy por debajo del objetivo del proyecto.

Tabla 5.1.8 Comparación de las mejores semillas para el presente proyecto

Ranking	Marca	Semilla	Region	Fecha Siembra	Densidad de siembra (Semillas/ha)	Ciclo	Cosecha Dias		Floracion Dias		Color	Altura Planta (Cm)	Altura Mazorca (Cm)
							Minimo	Maximo	Minimo	Maximo			
1	ASGROW	RX-860	Norte	Mayo-Junio	90,000	Precoz	90	95	61	65	Blanco	263	102
2	ASGROW	Antilope	Norte	Abril/Mayo	90,000	Intermedio	105	110	69	71	Blanco	301	130
3	ASGROW	A 7573	Noreste	Abril/Mayo	65,000	Intermedio	95	105	65	70	Blanco	230	140
4	Syngenta	NK252	CEO	Primavera/Otono	65,000	Intermedio	130	130	53	54	Amarillo	290	145
5	Dekalb	DK-4050	Noreste	Mayo-Junio	85,000	Intermedio Tardio	145	150	80	85	Amarillo	210	100
6	ASGROW	GARANON	Noreste	Abril/Mayo	85,000	Tardio	150	160	75	85	Blanco	230	110
7	ASGROW	Hipopotas	Noreste	Abril/Mayo	85,000	Intermedio Tardio	150	160	75	85	Blanco	230	110
8	Dekalb	DK-1050	Noreste	Mayo-Junio	75,000	Intermedio Tardio	150	160	75	85	Amarillo	200	85
9	Syngenta	N83N5	Sinaloa	Mayo-Junio	90,000	Precoz	165	170	62	64	Amarillo	280	135
10	Syngenta	NK307W	CEO	Mayo-Junio	90,000	Intermedio Precoz	170	175	62	64	Amarillo	305	135
11	ASGROW	CARIBU Y	Noreste	Abril/Mayo	85,000	Intermedio	145	175	75	85	Blanco	220	110
12	ASGROW	RX-840	Norte	Abril/Mayo	95,000	Precoz	170	180	74	76	Amarillo	242	105
13	Pioneer	P1898	Centro No	Abril/Mayo	90,000	Intermedio	170	180	75	80	Amarilo	270	120
14	Pioneer	P1382	Centro No	Abril/Mayo	90,000	Intermedio	170	180	75	80	Amarilo	270	120
15	Pioneer	P1445	Centro No	Abril/Mayo	90,000	Intermedio Precoz	170	180	75	80	Amarilo	270	120
16	Pioneer	32T83	Centro No	Abril/Mayo	90,000	Intermedio Precoz	170	180	75	80	Amarilo	270	120
17	Syngenta	NK307	Sinaloa	Noviembre-Diciembre	100,000	Intermedio Precoz	170	175	82	82	Amarillo	290	135
18	ASGROW	RX-717	Norte	Abril/Mayo	100,000	Intermedio Tardio		182		78	Amarillo	219	93
19	Syngenta	NK780	CEO	Mayo-Junio	No Info	Intermedio Precoz	180	185	63	68	Amarillo	300	105
20	Dekalb	DK-2048	Noreste	Mayo-Junio	75,000	Intermedio	140	145	75	85	Amarilo	200	100
21	Dekalb	DK-357	Noreste	Mayo-Junio	60,000	Intermedio Tardio	140	145	65	70	Amarilo	270	110
22	Agroferza	H-311		Mayo-Junio	55,000					78	Blanco	280	

A continuación, se presenta el análisis detallado de los híbridos que mostraron mayor nivel de compatibilidad con las condiciones requeridas:

ASGROW RX-860 (Ranking #1)

- Este híbrido se identifica como la opción con mayor compatibilidad, al cumplir con los criterios más relevantes del modelo. Su ciclo precoz de 90-95 días se ajusta dentro de la ventana libre de heladas de 115 días, permitiendo la cosecha antes de la primera helada estimada. Con una densidad de siembra recomendada de 90,000 semillas/ha, no solo cumple, sino que se alinea favorablemente con el objetivo de 78,000 semillas/ha, lo que puede incrementar el potencial de rendimiento bajo condiciones adecuadas. Su período de floración (días 61-65) ocurre fuera de la ventana de máximo riesgo de estrés por calor, lo que sugiere un menor nivel de exposición a este tipo de condiciones.

ASGROW Antilope (Ranking #2)

- Este híbrido se considera como una alternativa viable, pero con ciertas consideraciones. Su ciclo intermedio de 105-110 días lo ubica en el límite superior de la ventana de siembra segura, por lo que, aunque aceptable, presenta un nivel

de riesgo ligeramente mayor frente a una posible helada temprana en comparación con el RX-860. Su densidad de 90,000 semillas/ha es igualmente adecuada. Bajo este contexto, se mantiene como una alternativa de respaldo dentro del esquema de selección.

El resto de los híbridos fueron descartados por presentar una o más incompatibilidades críticas con los requisitos del proyecto. Varios híbridos fueron descartados porque su densidad recomendada se encuentra por debajo del objetivo de 78,000 semillas/ha, lo que limita su potencial de rendimiento bajo el diseño planteado. En este grupo se encuentran:

- ASGROW A 7573 (Ranking #3): Aunque su ciclo de 95-105 días es aceptable, su densidad de 65,000 semillas/ha reduce su compatibilidad con el esquema de alta densidad.
- Syngenta NK252 (Ranking #4) y Dekalb DK-2048 (Ranking #20): Presentan una combinación de restricción productiva, al integrar densidades bajas (65,000 y 75,000 semillas/ha, respectivamente) con ciclos de cosecha superiores a lo recomendado (130 y 140-145 días).
- Dekalb DK-357 (Ranking #21) y Agroferza H-311 (Ranking #22): Presentan las densidades más bajas de la lista (60,000 y 55,000 semillas/ha) , lo que reduce significativamente su viabilidad dentro del modelo de alta productividad.

Ciclo de Cosecha Excesivamente Largo: La mayoría de los híbridos analizados fueron descartados por este motivo. Un ciclo mayor a 120 días incrementa el riesgo de exposición a heladas. En esta categoría se incluyen materiales que, a pesar de presentar características favorables, no se ajustan a las condiciones climáticas del modelo:

- Híbridos de Ciclo Tardío (145-160 días): Como DK-4050, GARANON, Hipopotamo y DK-1050 (Rankings #5 al #8). Su ciclo extendido los hace incompatibles con la ventana climática analizada.

- Híbridos de Gran Potencial Genético, pero Ciclo Incompatible: Los materiales Pioneer (P1898, P1382, P1445, 32T83 - Rankings #13 al #16) y otros como Syngenta NK307 y ASGROW RX-717 (Rankings #17 y #18) presentan rendimientos reportados elevados. Sin embargo, sus ciclos de 170 a 182 días exceden significativamente la ventana climática estimada, por lo que no se consideran adecuados bajo este esquema.

Falta de Información Crítica: El híbrido Syngenta NK780 (Ranking #19) fue descartado debido a la falta de datos sobre su densidad de siembra, lo que limita su evaluación dentro del análisis comparativo.

Conclusión de la Preselección

Tras el análisis, el panorama se reduce a un grupo limitado de opciones compatibles con los requisitos de ciclo y densidad establecidos. Dentro de este grupo, el ASGROW RX-860 se posiciona como la opción con mayor ajuste técnico, al presentar menor exposición a riesgo climático y un alto potencial de rendimiento bajo las condiciones del modelo. El ASGROW Antilope se mantiene como una alternativa viable, con una consideración importante respecto a su cercanía al límite superior de ciclo. La selección de otros híbridos implicaría mayores niveles de riesgo dentro del escenario analizado, lo que podría comprometer el desempeño del sistema productivo.

5.1.6. Distribución de población

La configuración espacial del cultivo, determinada por la densidad de población y la geometría de siembra, constituye un factor agronómico crítico para maximizar la interceptación de recursos ambientales y, en consecuencia, el potencial productivo del cultivo. Para el presente proyecto, se establece una densidad objetivo de 78,000 semillas por hectárea y una distancia entre surcos de 0.76 metros. La elección de una distancia entre surcos de 0.76 m se fundamenta en un equilibrio entre el fundamento agronómico y la practicidad operativa. El estudio de (Barbieri, 2012) demostró que, si bien la reducción del espaciamiento entre surcos de 0.70 m a 0.35 m incrementó la eficiencia en el uso del

agua en condiciones de estrés hídrico o nitrogenado, no se registró un aumento significativo en la evapotranspiración estacional. Este beneficio puede atribuirse a una distribución espacial mejorada de las plantas que optimiza la interceptación de la radiación fotosintéticamente activa (RFA).

Respecto a la orientación de los surcos, la literatura especializada, como el trabajo de (Torres, 2017), indica que una orientación Este-Oeste puede maximizar teóricamente la interceptación de RFA al permitir una incidencia solar más perpendicular al mediodía. Sin embargo, esta ventaja puede verse contrarrestada en regiones con alta incidencia de estrés térmico, donde la misma configuración podría elevar la temperatura del dosel por encima de los umbrales óptimos durante las etapas fenológicas críticas, como la floración (Worku, 2020). En consecuencia, y considerando el riesgo de altas temperaturas identificado en el análisis climático del proyecto, se plantea la selección de una orientación predominante Norte-Sur, mostrada en la Ilustración 5.1.7, la cual favorece una distribución más homogénea de la radiación a lo largo del día y puede contribuir a mitigar el riesgo de estrés por calor durante las horas de máxima insolación.



Ilustración 5.1.7 Imagen satelital del predio con orientación norte sur.

La combinación de la densidad de población (~78,000 semillas/ha) y la distancia entre surcos (0.76 m) define un arreglo espacial semi-equidistante planteado para reducir

la competencia intra-específica por luz, agua y nutrientes. Como sostienen (Barbieri, 2012), una distribución espacial más uniforme puede derivar en un dosel mejor estructurado que captura la radiación de manera más eficiente. Para materializar la densidad objetivo en campo, se plantea el cálculo la distancia entre semillas sobre la línea de siembra mediante la fórmula agronómica estándar:

$$Dist. \text{sems. (m)} = \frac{10,000}{Densidad \text{ (Sems./ha)} * Dist. \text{Surcos (m)}} \quad (5.1.8)$$

Aplicando los parámetros del proyecto:

- Densidad de siembra: 78,000 semillas/ha
- Densidad entre surcos: 0.76 m

$$Distancia \text{ entre semillas} = \frac{10,000}{78,000 * 0.76} \quad (5.1.9)$$

$$Distancia \text{ entre semillas} = \frac{10,000}{59,280} \quad (5.1.10)$$

$$Distancia \text{ entre semillas} \approx 0.1687 \text{ m} \quad (5.1.11)$$

Por lo tanto, la distancia entre semillas sobre el surco se estima de 16.9 cm. Esta configuración permite alcanzar la población objetivo dentro del diseño metodológico y establece una base estructural para aproximarse al rendimiento planteado de 12 toneladas por hectárea.

5.1.7. Análisis de suelo

El manejo agronómico convencional tiende a enfocarse en la parte visible del cultivo, es decir, desde la superficie del suelo hacia arriba. Las labores de cuidado se orientan a mantener el cultivo libre de malezas, plagas y problemas nutrimentales, así

como a garantizar su sanidad general. Sin embargo, con menor frecuencia se evalúa lo que ocurre en la parcela desde la superficie hacia abajo. Es fundamental comprender que el comportamiento observado en la parte aérea de las plantas está asociado, en gran medida, consecuencia de las condiciones y procesos que tienen lugar en el suelo. Para una caracterización precisa, se plantea la realización de un muestreo de suelos de alta precisión, utilizando muestras compuestas obtenidas mediante el método de grid sampling, con una cuadrícula de 25×25 metros, Ilustración 5.1.8 . Es importante señalar que, aunque esta densidad de muestreo se considera técnicamente adecuada, en la práctica no siempre es factible debido a los costos involucrados, ya que cada muestra tiene un valor aproximado de \$2,000 pesos.

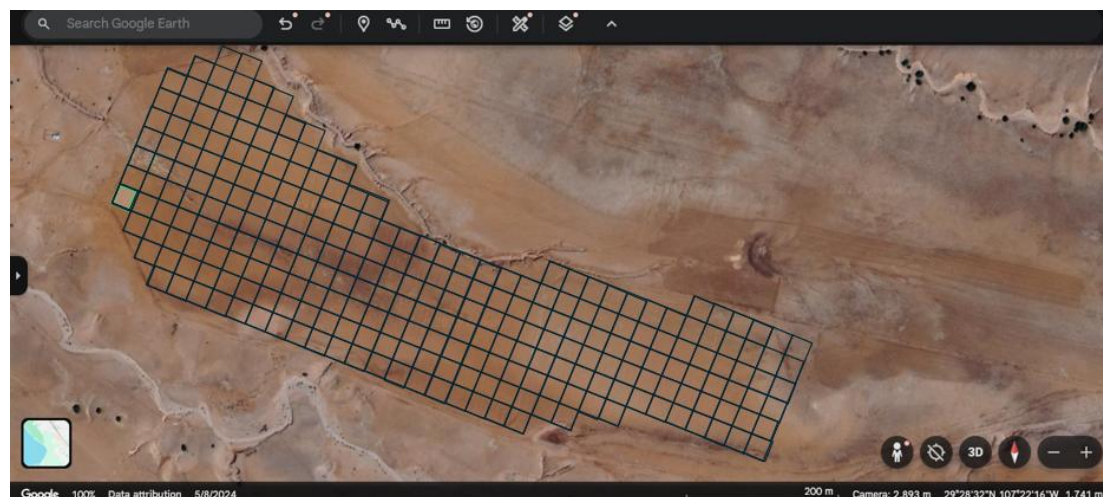


Ilustración 5.1.8 Imagen satelital del predio dividido utilizando el método grid sampling.

El análisis de suelo del predio muestra un pH de 5.7, lo que indica que se encuentra ligeramente por debajo del rango ideal para maíz (que es de 6.0 a 7.4). Esto sugiere que el suelo es un poco ácido, la cual puede ser manejada y ajustada mediante prácticas agronómicas adecuadas. Por el lado de la conductividad eléctrica, no se observan niveles significativos de sales, por lo que el suelo no presenta limitantes por salinidad. El contenido de materia orgánica se encuentra bajo, entre 0.7% y 1.4% dependiendo la zona

del predio, con promedio de aproximadamente 1.0 a 1.4%. Cuando la materia orgánica es baja, el suelo presenta menor capacidad de retención de nutrientes y humedad, así como menor agregación estructural. Esta condición puede mejorarse mediante la incorporación de composta o residuos orgánicos. En cuanto a nutrientes, se observa un desbalance en su disponibilidad. El nitrógeno disponible se encuentra en niveles bajos, y como este elemento se pierde fácil, es probable que requiera suplementación vía fertilización. El calcio anda en nivel medio pero su saturación es alta, mientras que el magnesio está bajo tanto en contenido como en saturación, lo que refleja un desbalance entre estos dos elementos. Se considera necesario monitorear los micronutrientes, debido a la posible aparición de deficiencias. La textura del suelo es franco arenoso, es decir, de grano grueso. La densidad aparente es media, lo que sugiere condiciones favorables de estructura, aireación e infiltración. Se plantea como importante verificar que no haya capas duras abajo y que la profundidad sea mayor a 70 cm, para que la raíz pueda explorar bien.

Desde una perspectiva del sistema productivo, el objetivo es la mejora progresiva de la fertilidad del suelo, mediante el incremento del contenido de materia orgánica y la capacidad de retención hídrica. La práctica de reciclar los residuos agrícolas se plantea como una estrategia relevante para mejorar la eficiencia en el uso de los recursos edáficos.

5.1.8. Plan de corrección de suelo

El pH del suelo constituye un factor determinante en la productividad agrícola, ya que regula la disponibilidad de nutrientes, el desarrollo radicular y la composición del microbiota edáfico. En suelos franco-arenosos, caracterizados por su bajo contenido de calcio, magnesio y potasio, como lo confirma el análisis de suelo, el encalado estratégico se plantea como una práctica fundamental para corregir la acidez y mejorar la disponibilidad de estos cationes esenciales. Dentro del diseño metodológico, se considera la aplicación de 200 a 300 de kilogramos por hectárea de cal dolomítica o 80 kg/ha de sulfato de magnesio. La incorporación se plantea a una profundidad aproximada de 30 cm, considerando un período de reacción del material que puede extenderse hasta principios de junio en función de las condiciones de humedad y precipitación.

A su vez, se considera la incorporación de una enmienda orgánica de la mayor cantidad posible, con un mínimo de 10 toneladas por hectárea. La cual debe ser composta madura o estiércol composteado. Esta práctica puede contribuir al incremento de materia orgánica, mejorando la CIC, incrementa la retención de agua y mejora el PH del suelo. Paralelamente se plantea la implementación de un sistema de riego por aspersión de baja presión, las pruebas de infiltración se consideran necesarias para evaluar el comportamiento hídrico del suelo, la cual debe ser aproximadamente de unos 10 cm de profundidad después de tres horas de riego. Este esquema de riego se considera como una alternativa viable desde el punto de vista técnico y económico frente a otros sistemas como el goteo, particularmente en contextos de suelos arenosos donde la uniformidad de humedad se vuelve crítica para el desarrollo del cultivo. La combinación del encalado con un sistema de riego puede contribuir a la construcción sistemática de la fertilidad del suelo y la eficiencia productiva.

Tras definir el estado de preparación del suelo dentro del diseño metodológico, se plantea la realización de la gradación rotativa a una profundidad de 4-5 cm, operación orientada a interrumpir la capilaridad del suelo y favorecer la formación de una cama de siembra uniforme. Este proceso puede contribuir tanto a la eliminación de malezas en germinación y establecidas como a la generación de condiciones adecuadas para la siembra. La calidad de esta etapa se considera relevante, pues existe evidencia de relación entre las condiciones de siembra y variables finales de rendimiento como número de mazorcas, uniformidad y peso específico.

El proceso de rehabilitación se plantea bajo un enfoque de construcción de fertilidad basado en:

Estrategias Centrales de Manejo:

- Incorporación anual de todos los residuos agrícolas.
- Eliminación completa de prácticas de quema o empacado de rastrojos.
- Sustitución del barbecho tradicional por desmenuzado y rastreo superficial.

- Aplicación constante de materiales orgánicos.

El proceso sugiere que la construcción de fertilidad en suelos degradados es un proceso gradual y requiere persistencia, lo que resalta la importancia de la continuidad en la aplicación de prácticas de mejora.

5.1.9. Labranza del suelo

Se considera la realización de la labor de rastreo que cumple dos funciones esenciales: la subsolación para romper el piso de arado detectado, mejorando el desarrollo radical profundo, la infiltración hídrica y la aireación del subsuelo; y la incorporación de cal dolomita. La cal necesita tiempo para reaccionar con el suelo y poder neutralizar la acidez, como un mínimo de 2 a 3 meses antes de la siembra, así que al considerar la fecha de siembra como el 25 de mayo la labor de incorporación debe ser en febrero o más tardar marzo.

Para la incorporación primero se distribuyen los 300 kg/ha de cal sobre el terreno y luego se pasa el subsolador, que entierra la cal y afloja el suelo en profundidad. Este sistema, debe trabajar a 55 cm de profundidad con aletas para una ruptura completa del horizonte, debe sustentarse en un diagnóstico profundo del suelo que identifique condiciones, limitantes, ventajas y desventajas particulares, transformando esas limitantes en fortalezas mediante un manejo específico que considere clima, plagas, malezas, enfermedades y especialmente la fertilidad del suelo.

5.1.10. Diseño de nutrición integral

La nutrición constituye otro pilar esencial, requiriendo un diagnóstico preciso y la aplicación de formulaciones balanceadas de alta calidad. En este caso, se implementa una fórmula específica para cada etapa fenológica que combina nitrógeno, fósforo, potasio, y complementada con micronutrientes esenciales. Este enfoque personalizado de la siembra, donde cada detalle se planifica y ejecuta con precisión y dedicación, representa

la base fundamental para el éxito productivo posterior, hay 3 principios claves para programar la fertilización correctamente.

1. Demanda diferencial por etapa: La absorción no es lineal. El período crítico de mayor demanda para la mayoría de los nutrientes ocurre entre V10 y R3 (desde 10 hojas hasta grano lechoso). Para el zinc y el cobre, la demanda se extiende hasta la madurez fisiológica.
2. Partición de nutrientes: El índice de cosecha (proporción que va al grano) es alto para fósforo (79%), zinc (62%) y nitrógeno (58%), mientras que para calcio es muy bajo (5%). Esto significa que los nutrientes con alto índice de cosecha deben reponerse con mayor énfasis después de la cosecha, mientras que los nutrientes que quedan en el rastrojo pueden reciclarse.
3. Interacción nitrógeno-nutrientes: El nitrógeno es el motor de la absorción de otros nutrientes. Una deficiencia severa de nitrógeno reduce drásticamente la acumulación de fósforo, azufre y micronutrientes (Ignacio A. Ciampitti, 2013).

Para relacionar la cantidad total de nutrientes necesarios con la cantidad de plantas, el enfoque más sólido parte de un principio fisiológico: la extracción de nutrientes está determinada fundamentalmente por el rendimiento de grano, no directamente por la densidad de población. En los estudios revisados se establece que, para híbridos modernos bajo condiciones de alta productividad, la cantidad de nutrientes absorbidos por hectárea se puede estimar a partir del rendimiento objetivo, utilizando los valores de extracción por tonelada de grano. Por lo tanto, la fórmula general es:

$$\begin{aligned} \text{Nutriente (kg ha}^{-1}\text{)} \\ = \text{Rend. obj. (t ha}^{-1}\text{)} * \text{Coef. extracc. (kg t}^{-1}\text{)} \end{aligned} \quad (5.1.12)$$

Los coeficientes de cada nutriente se presentan en la Tabla 5.1.9.

Tabla 5.1.9 Coeficientes de extracción por tonelada de grano.

Nutriente	Extracción por tonelada de grano
Nitrógeno (N)	24 – 26 kg/t
Fósforo (P ₂ O ₅)	10 – 12 kg/t
Potasio (K ₂ O)	18 – 20 kg/t
Magnesio (Mg)	5 – 6 kg/t
Azufre (S)	2 – 3 kg/t
Zinc (Zn)	0.17 – 0.20 kg/t
Manganeso (Mn)	0.042 – 0.046 kg/t
Cobre (Cu)	0.019 – 0.020 kg/t
Boro (B)	0.009 – 0.010 kg/t

Para el cálculo total por hectárea se debe realizar la siguiente operación considerando el cálculo inicial donde se planteó una siembra de 72,000 plantas bajo la suposición de un rendimiento de 200 gramos por planta, por poner un ejemplo se calcula el zinc.

$$Zn = 0.2 \text{ kg grano} * 0.00018 \text{ KgZn grano} = 0.000036 \text{ kg Zn} \quad (5.1.13)$$

$$Zn = 0.000036 \frac{\text{kg}}{\text{planta}} * 72,000 \text{ plantas ha} = 2.592 \text{ kg ha} \quad (5.1.14)$$

También se puede calcular directamente la cantidad necesaria, ya que solo depende del rendimiento y no de la población, como se muestra en la Tabla 5.1.10.

Tabla 5.1.10 Extracción de nutrientes por tonelada de grano

Nutriente	Extracción por tonelada de grano (Kg/t)			Nutriente (kg/Ha)
	Min	Max	Average	
Nitrógeno (N)	24.00	26.00	25.00	360.00
Fósforo (P ₂ O ₅)	10.00	12.00	11.00	158.40
Potasio (K ₂ O)	18.00	20.00	19.00	273.60
Magnesio (Mg)	5.00	6.00	5.50	79.20
Azufre (S)	2.00	3.00	2.50	36.00
Zinc (Zn)	0.17	0.20	0.19	2.66
Manganeso (Mn)	0.04	0.05	0.04	0.63
Cobre (Cu)	0.02	0.02	0.02	0.28
Boro (B)	0.01	0.01	0.01	0.14

Fertilización de arranque

La fertilización de arranque o siembra es una de las más importantes ya que ayudan al desarrollo radicular.

- Fertilización de arranque: Aplicar 22 kg/ha de DAP (18-46-0) y 26 kg/ha de sulfato de potasio (0-0-50).
- Por qué: El fósforo es crítico en etapas tempranas para el desarrollo radicular; es inmóvil en el suelo y debe colocarse cerca de la semilla. El potasio temprano fortalece la arquitectura celular y la tolerancia al estrés. Para su máximo aprovechamiento y disponibilidad en el desarrollo radicular, se debe bandear a 5 cm al lado y 5 cm debajo la semilla.
- Como micronutrientes de arranque se deben incluir en la mezcla 2 kg/ha de sulfato de zinc y 1.5 kg/ha de sulfato de cobre.
- Por qué: El zinc y el cobre tienen baja movilidad en el suelo; colocarlos en la línea de siembra asegura su disponibilidad en la rizosfera durante la etapa crítica de desarrollo radicular.

Etapas Vegetativa (V6-V8) – Primera Aplicación de Nitrógeno

Objetivo: Satisfacer la demanda creciente de nitrógeno para la formación de biomasa y la definición del número de hileras de grano.

- Fertilización nitrogenada: Aplicar 90 kg N/ha en forma de urea (46-0-0) o UAN (32-0-0).
- Por qué: La tasa máxima de absorción de nitrógeno ocurre entre V10 y R1. La aplicación en V6 permite que el nitrógeno esté disponible justo antes del período de mayor demanda. El fraccionamiento evita pérdidas por lixiviación en suelos arenosos.
- Aplicación de potasio complementaria (si no se aplicó todo al arranque): Aplicar 26 kg/ha de sulfato de potasio (0-0-50).
- Por qué: El potasio alcanza su máximo de absorción en V10-R1; si no se aplicó suficiente al arranque, este es el momento de complementar.

Etapas de Transición (V10-V12) – Segunda Aplicación de Nitrógeno y Micronutrientes Foliares

Objetivo: Cubrir el pico de demanda de nitrógeno, fósforo y azufre antes de la floración, y asegurar la disponibilidad de micronutrientes para la viabilidad del polen y el amarre de grano.

- Segunda aplicación de nitrógeno: Aplicar 90 kg N/ha (urea o UAN).
- Por qué: En este período se absorbe hasta el 30% del nitrógeno total. Es la etapa de mayor tasa de absorción.
- Aplicación foliar de micronutrientes: Aplicar una mezcla foliar que contenga zinc quelatado (1 kg/ha de Zn EDTA), boro (0.5 kg/ha), manganeso (0.5 kg/ha) y cobre (0.2 kg/ha).
- Por qué: (Borges, 2009) demuestran que la mayor acumulación de zinc ocurre entre R1 y R6, pero el período crítico para la formación del polen es antes de floración. El boro es esencial para la elongación del tubo polínico. La aplicación foliar en este momento asegura que los micronutrientes estén disponibles para los procesos reproductivos.
- Aplicación de sulfato de amonio (opcional): Si el suelo es deficiente en azufre ($S < 10$ ppm), aplicar 50-70 kg/ha de sulfato de amonio (21-0-0-24S).
- Por qué: El azufre tiene un patrón de absorción similar al nitrógeno y es esencial para la síntesis de proteínas en el grano. Su deficiencia reduce la eficiencia del nitrógeno.

Floración (R1) – Nutrición para el Llenado de Grano

Objetivo: Mantener la actividad fotosintética y asegurar la translocación de nutrientes hacia el grano.

- Aplicación foliar de nitrógeno y micronutrientes: Aplicar una mezcla foliar de urea de baja concentración (10-15 kg N/ha) con zinc quelatado (0.5 kg/ha) y cobre (0.2 kg/ha).
- Por qué: A partir de R1, la absorción radicular de nutrientes disminuye gradualmente, pero la demanda del grano continúa. El zinc y el cobre siguen

acumulándose hasta la madurez fisiológica (Ciampitti, 2013). La aplicación foliar en este momento sostiene el llenado de grano y mejora la calidad del grano.

- Monitoreo de potasio: Si hay signos de deficiencia (hojas bajas con bordes quemados), se puede complementar con una aplicación foliar de nitrato de potasio (KNO_3).
- Por qué: Aunque la absorción de potasio se estabiliza después de R3, el estrés hídrico o de salinidad puede limitar su disponibilidad en la etapa de llenado.

En base a los puntos posteriores, se puede obtener como resultado la cantidad total por nutriente, mostrados en la Tabla 5.1.11.

Tabla 5.1.11 Cantidad de nutrientes por etapa fenológica.

Etapa fenológica	N (kg/ha)	P ₂ O ₅ (kg/ha)	K ₂ O (kg/ha)	Zn (kg/ha)	B (kg/ha)	Mn (kg/ha)	Cu (kg/ha)	Mg (kg/ha)	Forma de aplicación
Pre-siembra	-	-	-	2 (suelo)	1 (suelo)	-	-	50-80 (sulfato Mg)	Incorporado + composta
Siembra (arranque)	10 (DAP)	22 (DAP)	26 (K_2SO_4)	2 (suelo)	-	-	1.5 (suelo)	-	Bandado
V6-V8	90	-	26 (K_2SO_4)	-	-	-	-	-	Al voleo o en cobertura
V10-V12	90	-	-	1 (foliar)	0.5 (foliar)	0.5 (foliar)	0.2 (foliar)	-	Foliar
R1 (floración)	10-15 (foliar)	-	-	0.5 (foliar)	-	-	0.2 (foliar)	-	Foliar
Total	200-205	22	52	5.5	1.5	0.5	1.9	50-80	

1. Justificación Científica del Fraccionamiento

2. **Nitrógeno:** Se divide en tres momentos (arranque, V6-V8, V10-V12) más una pequeña aplicación foliar en R1. Esto responde a:

- El patrón de absorción de N muestra un pico entre V10 y R3 (Ciampitti et al., 2013a).
- En suelos arenosos, la lixiviación es alta; el fraccionamiento reduce pérdidas.
- El N foliar en R1 sostiene la síntesis de proteínas en grano sin saturar el suelo.

3. **Fósforo y potasio:** Se aplican principalmente al arranque porque:

- El fósforo es inmóvil; debe colocarse cerca de la semilla.
- El potasio en arranque y cobertura temprana (V6-V8) cubre el pico de absorción que ocurre antes de floración (Ciampitti, 2013).

4. **Zinc y cobre:** Se aplican en presiembra (al suelo) y en aplicaciones foliares en V10-V12 y R1 porque:

- (Borges, 2009) demostraron que el zinc continúa acumulándose hasta madurez.
- (Ciampitti, 2013) encontraron que el 50% del zinc y cobre se absorbe después de floración.
- La aplicación foliar en etapas reproductivas asegura su disponibilidad cuando la absorción radicular disminuye.

5. **Boro y manganeso:** Se aplican foliarmente en V10-V12 porque:

- El boro es crítico para la elongación del tubo polínico justo antes de floración.
- El manganeso tiene un pico de absorción alrededor de floración (Borges et al., 2008).

6. **Magnesio:** Se aplica en presiembra porque:

- El análisis de suelo mostró saturación baja de magnesio.
- El magnesio es poco móvil en el suelo; debe corregirse antes de la siembra.
- El sulfato de magnesio también aporta azufre, que es crítico para la síntesis de proteínas.

5.2. Fase 2: Preparación y Siembra (Pasos 6-10)

5.2.1. Selección y tratamiento de semilla

La selección de insumos de máxima calidad es fundamental en este proceso. La semilla, elemento clave, debe presentar uniformidad en tamaño y recibir un tratamiento profesional integral que combine fungicidas e insecticidas de alta eficacia con bioinoculantes especializados que promuevan la germinación temprana, el desarrollo radicular profundo y la colonización microbiana benéfica. Los tratamientos químicos como fungicidas e insecticidas pueden llegar a afectar la efectividad de los microorganismos benéficos si se mezclan directamente. Por esta razón se deben de

programar una aplicación secuencial comenzando con el tratamiento químico y después de un periodo de secado la bio inoculación.

Este paso se realiza con días o semanas antes de la siembra, una vez que ya se cuente con la semilla elegida en los primeros pasos. La fórmula para aplicar sobre la semilla se presenta en la Tabla 5.2.1.

Tabla 5.2.1 Formula de inoculación para semilla.

Componente	Producto Comercial Ejemplo	Dosis por kg de semilla	Dosis Total (para 78,000 semillas ≈ 31.2 kg)	Función
Fungicida	Maxim XL (Fludioxonil + Metalaxil-M)	3.0 ml	94 ml	Controla Fusarium, Pythium, Rhizoctonia, previniendo la pudrición de semilla y plántula (Damping-off).
Insecticida	Gaucho FS (Imidacloprid) o Poncho (Clothianidin)	2.5 ml	78 ml	Protege contra plagas del suelo como gusanos de alambre, gallina ciega y pulgones durante los primeros 30-45 días.
Bioestimulante (Aminoácidos)	Aminoplant, Terra-Sorb	3.0 ml	94 ml	Reduce el estrés germinativo, estimula el metabolismo energético y la síntesis de proteínas.
Bioestimulante (Algas)	Kelpak, Algafert (Ascophyllum nodosum)	2.5 ml	78 ml	Promueve el desarrollo radicular temprano gracias a fitohormonas naturales (citoquininas, auxinas) y oligoelementos.
Adherente	Silwet, Citowett	0.5 ml	16 ml	Mejora la adherencia y cobertura de la mezcla sobre la semilla, asegurando una aplicación homogénea.
Agua	Agua potable o destilada	C.s.p. 10 ml	312 ml	Es el vehículo para los productos y asegura una distribución uniforme.

Para la inoculación se deben de seguir una serie de pasos específicos.

- Pesaje: Pesar la cantidad exacta de semilla a tratar.
- Preparación del Caldo: En un recipiente mezclar el agua con el adherente. Añadir los productos en el siguiente orden, agitando entre cada adición: Insecticida, fungicida, aminoácidos, algas.
- Aplicación: Utilizando una mezcladora de semillas aplicar el caldo de forma homogénea sobre las semillas en movimiento hasta cubrirlas completamente.
- Secado: Extender las semillas tratadas sobre una lona o superficie limpia en un lugar seco y ventilado, a la sombra. Dejar orear durante 2-4 horas hasta que la superficie de la semilla esté completamente seca al tacto.

5.2.2. Preparación de maquinaria

Para lograr una siembra de máxima calidad, cada elemento debe funcionar con precisión absoluta según lo planificado y calibrado meticulosamente. En este caso específico, se

estableció una configuración técnica detallada: distancia entre surcos de 76 cm, utilizando 78,000 semillas con un espaciamiento preciso de 16.9 cm entre cada una. La profundidad de siembra se mantuvo en 5 cm por debajo y al lado de la semilla, con aplicación de insecticida granulado directamente sobre la semilla y una presión de compactación de 60 a 65 kg.

5.2.3. Manejo de residuos postcosecha

El manejo científico de los residuos postcosecha se orienta hacia objetivos concretos: incrementar la materia orgánica del suelo, reciclar el 100% de los nutrientes y transformar estos residuos en un medio propicio para el desarrollo de consorcios microbianos benéficos. Estos microorganismos, al ser inoculados, aceleran la mineralización de los residuos, liberan nutrientes de manera eficiente, fijan nitrógeno atmosférico, controlan patógenos como *Fusarium* y mejoran la estructura del suelo, estimulando así la vida edáfica. Además, este proceso busca optimizar la porosidad, la formación de agregados estables, la retención hídrica y el desarrollo radicular, elementos indispensables para elevar la productividad.

Es crucial reconocer que los residuos contienen una proporción significativa de los nutrientes extraídos por el cultivo: aproximadamente 20-25% del nitrógeno y fósforo, 80% del potasio, 85% del magnesio y calcio, 30% del azufre y porcentajes elevados de micronutrientes como boro, cobre, hierro y manganeso. Sin embargo, el manejo inadecuado de estos residuos puede limitar su potencial. Dejar más del 90% en superficie promueve su descomposición aeróbica, liberando CO₂ a la atmósfera y reduciendo la formación de materia orgánica estable, además de complicar el control de malezas y la operación de la siembra. Por otro lado, incorporarlos a más de 15 cm de profundidad genera condiciones anaeróbicas que favorecen la lignificación y no la generación de materia orgánica funcional.

Por ello, es imperativo realizar un diagnóstico detallado y profesional de cada predio, considerando su estructura, porosidad, nivel de compactación, cantidad de

residuos y características biológicas, físicas y químicas. Solo con base en esta información es posible definir un protocolo de manejo paso a paso, científico y específico, que convierta los residuos en un verdadero motor de fertilidad y productividad sostenible.

Para que los residuos de cosecha cumplan con los objetivos de incrementar la vida del suelo, promover el desarrollo de hongos y bacterias benéficas inoculadas, mejorar la infiltración y retención hídrica, aumentar la capacidad de intercambio catiónico, reciclar la totalidad de los nutrientes presentes y eliminar la compactación, es esencial partir de un diagnóstico preciso de las condiciones particulares de cada lote. La teoría no siempre se traslada directamente a la práctica, por lo que se debe guiar por las características específicas de cada situación, evitando recetas universales. La cantidad de residuos generados es significativa, calculándose al menos una tonelada de rastrojo por cada tonelada de grano cosechado. El protocolo establecido implica primero desmenuzar rápidamente los residuos, seguido de un rastreo inicial dada la abundancia de material. Posteriormente, se procede a una labor de subsuelo que simultáneamente permite la inoculación con un consorcio microbiano específico, mostrados en la Tabla 5.2.2.

Tabla 5.2.2 Producto de consorcios microbianos

Producto Syngenta	Ingrediente Activo (Función Principal)	Dosis Sugerida (por ha)	Justificación Técnica
Taegro	Bacillus subtilis var. amyloliquefaciens cepa FZB24 (Supresión de Patógenos y Descomposición)	0.5 – 1.0 kg	Agente de control biológico que suprime patógenos (Fusarium, Rhizoctonia). Actúa como un "despertador" metabólico para la comunidad microbiana nativa, acelerando la descomposición de la materia orgánica y mejorando la disponibilidad de nutrientes.
Costar	Bacillus thuringiensis var. kurstaki (Control de Plagas en Residuos)	1.0 – 2.0 kg	Insecticida biológico que controla larvas de insectos que podrían refugiarse en el rastrojo (como el gusano cogollero). Su acción por ingestión, al ser consumido por las larvas, las elimina, protegiendo el cultivo siguiente y evitando que dañen el proceso de descomposición.
VIVA	Fertilizante orgánico líquido con Carbono Orgánico, Nitrógeno y Potasio (Bioestimulación del Suelo)	10 L (aplicación al suelo)	Bioestimulante que revitaliza la actividad microbiológica del suelo y mejora su estructura. Al aplicarse al suelo después de la trilla, crea un ambiente óptimo para que los microorganismos descomponedores (sean los del consorcio o los nativos) trabajen con mayor eficiencia.

Estos ingredientes están diseñados para acelerar la mineralización de los residuos, transformándolos en materia orgánica estable, facilitando el reciclaje integral de nutrientes, incrementando la capacidad de retención de agua y porosidad, y mejorando la estructura del suelo. Este proceso, ejecutado ciclo tras ciclo, constituye la base para

construir sistemáticamente la fertilidad del suelo y alcanzar progresivamente mayores niveles de productividad.

El manejo de residuos inicia inmediatamente después de la cosecha con el paso fundamental de la desmenuzadora. Esta operación temprana persigue múltiples objetivos: conservar los nutrientes contenidos en las raíces que podrían perderse a través de los tallos recién cortados, acelerar el proceso de mineralización para transformar más rápidamente los residuos en materia orgánica, y facilitar las labranzas posteriores. La estrategia busca dejar entre el 20% y 25% de los residuos semienterrados en la superficie, lo que permite una mejor incorporación al suelo, favorece la colonización de los consorcios microbianos aplicados y contribuye a formar una cámara de siembra óptima que garantice un contacto adecuado entre la semilla y el suelo.

5.2.4. Inoculación de la semilla

La inoculación introduce microorganismos vivos en la rizosfera, los cuales se listan en la Tabla 5.2.3, los cuales forman asociaciones benéficas con la raíz para fijar nitrógeno, solubilizar fósforo y producir fitohormonas, lo que se traduce en un mayor vigor y eficiencia en el uso de nutrientes. Esta etapa se debe realizar inmediatamente antes de la siembra.

Tabla 5.2.3 Consorcio microbiano para inoculación de semilla

Componente	Producto Comercial Ejemplo	Dosis por kg de semilla	Dosis Total (para 31.2 kg de semilla)	Función
Fijador de Nitrógeno	Azospirillum brasilense (cepas Ab-V5/Ab-V6)	5.0 g	156 gr	Fija nitrógeno atmosférico, produce fitohormonas (auxinas) que estimulan el crecimiento radicular y mejoran la absorción de agua y nutrientes.
Solubilizador de Fósforo	Pseudomonas fluorescens	5.0 g	156 gr	Solubiliza fósforo inorgánico, produce sideróforos y compuestos antifúngicos, mejorando la disponibilidad de nutrientes y protegiendo la raíz.
Adherente Biológico	Melaza diluida (10%) o goma arábica (1%)	2.0 ml	62 ml	Mejora la adhesión de los microorganismos a la semilla, actuando como un vehículo protector.
Agua	Agua potable o destilada	C.s.p. 10 ml	312 ml	Vehículo para la aplicación uniforme de los inoculantes.

Para una correcta aplicación se deben seguir los siguientes pasos:

- Preparación del Caldo de Inóculo: En un recipiente limpio mezclar el agua con el adherente. Agregar los productos biológicos en el orden: Azospirillum, pseudomonas.

- Aplicación: Verter el caldo de inóculo sobre las semillas ya tratadas y secas. Mezclar suave pero minuciosamente para que todas las semillas queden cubiertas. Evitar golpes o fricción excesiva que puedan dañar a las bacterias.
- Siembra Inmediata: Una vez inoculadas, las semillas deben sembrarse el mismo día. El contacto prolongado con la humedad o el almacenamiento puede reducir la viabilidad de los microorganismos.

5.2.5. Siembra de precisión

La siembra se debe de hacer de una forma meticulosa y precisa, para este proceso se recomienda una sembradora que permita programar tirar el grano de una forma uniforme, operándola a una velocidad pausada de 4.5 km/h. La profundidad de siembra debe estar en un rango óptimo de 5.5 a 6 cm, entendiendo que una colocación demasiado profunda comprometería la germinación y el vigor, mientras que una posición superficial limitaría igualmente el desarrollo.

Seguido de la siembra se debe de realizar una aplicación de herbicida de presembrado, adaptado al espectro de maleza presente. Lo más recomendable es que la aplicación se realice mediante el uso de un dron agrícola ya que garantiza mayor precisión, de no ser así se puede aplicar el herbicida mediante el sistema de riego. El herbicida elegido para el predio presente es Integrity de la marca BASF, ya que ofrece un control contra malezas de hoja ancha y zacates los cuales son recurrentes en el predio. Como es un predio con una cantidad orgánica baja se recomienda utilizar 1.25 L/ha, diluidos en 400 litros de agua.

5.3. Fase 3: Manejo Fenológico Crítico (Pasos 12-14)

El monitoreo constante y las mediciones precisas en etapas críticas garantizan que se puede llegar a la meta propuesta, permitiendo cumplir la meta por hectárea. La uniformidad en la emergencia y el desarrollo inicial constituye uno de los pilares fundamentales para lograr esta ambiciosa meta productiva.

El seguimiento técnico del cultivo se debe realizar sistemáticamente en etapas fenológicas críticas: V2, V5, V9 y R3. Este proceso implica establecer puntos fijos de muestreo para evaluar continuamente el desarrollo del cultivo, con especial énfasis en el conteo y medición de mazorcas. El objetivo central de este enfoque es trascender la simple observación de efectos para identificar las causas subyacentes que determinan el rendimiento final. Esta información permite no solo diagnosticar las limitantes actuales, sino también validar la respuesta de los materiales genéticos y las prácticas de manejo implementadas.

Durante las etapas tempranas del desarrollo del maíz, es fundamental priorizar la formación de sistemas radiculares robustos desde la germinación. La planta debe contar con una arquitectura radical masiva que le permita acceder a los nutrientes y humedad incluso antes de la emergencia de la plántula. Este desarrollo radicular temprano determina la capacidad de absorción de recursos, influye directamente en el vigor y uniformidad de la germinación, y establece las bases para un crecimiento equilibrado. Para potenciar este proceso se recomienda utilizar el producto Hy roots, producido por Exsotec.

La complejidad del sistema se amplifica al considerar que el suelo constituye un organismo vivo con características únicas en sus dimensiones química, física y biológica. El manejo edáfico se basa en el reconocimiento del suelo como patrimonio fundamental que debe mejorarse continuamente mediante parámetros científicos medibles: capacidad de intercambio catiónico, pH, materia orgánica, conductividad eléctrica, carbonatos, perfil nutrimental, textura, estructura y porosidad. Sobre esta diagnosis precisa y las metas de rendimiento establecidas, seleccionamos fuentes de nutrientes específicas diseñadas para

condiciones particulares de suelo y cultivo, priorizando siempre la calidad y asimilabilidad de los fertilizantes y la excelencia en las aplicaciones, reconociendo que la nutrición del maíz representa un desafío técnico que exige precisión y conocimiento profundo de la fisiología vegetal.

La implementación efectiva de un programa de nutrición integrada trasciende el simple cálculo de cantidades para abordar aspectos críticos de timing, colocación y compatibilidad de insumos. La estrategia de aplicación debe responder meticulosamente a las preguntas fundamentales: cuándo aplicar, dónde colocar y cómo mezclar los nutrientes, considerando que estos aspectos determinantes son tan importantes como las dosis utilizadas. Esta misma precisión se aplica al componente biológico del sistema, donde la selección del consorcio microbiano debe basarse en un diagnóstico riguroso de las condiciones particulares del suelo y los objetivos productivos.

La calidad de los microorganismos aplicados constituye un factor irrenunciable, requiriendo cepas específicamente adaptadas a las condiciones edáficas y aplicadas mediante metodologías que aseguren su viabilidad y capacidad colonizadora. Es esencial proporcionarles residuos adecuados como sustrato y garantizar las condiciones fisicoquímicas óptimas para que establezcan relaciones simbióticas eficientes con las raíces, ejerciendo sus funciones de control biológico, solubilización de nutrientes y mejora de la salud radicular.

El enfoque está sustentado en el principio de reposición nutrimental integral. Cada cosecha que se lleva a cabo exporta nutrientes importantes a través del grano, y adicionalmente cantidades importantes quedan inmovilizadas en los rastrojos. La sostenibilidad del modelo productivo exige que las extracciones sean equilibradas con aportes equivalentes, pues cualquier desbalance conduce inevitablemente al agotamiento progresivo de la fertilidad edáfica. Esta convicción se traduce en la práctica mediante la reposición minuciosa de los nutrientes exportados, transformando el enfoque de mera extracción en un proceso de construcción permanente de fertilidad, donde el suelo como patrimonio fundamental se enriquece continuamente en lugar de degradarse.

La nutrición vegetal representa el factor que más impacta en la multiplicación de la producción, constituyendo una disciplina compleja sin espacio para recetas universales. La agricultura de precisión ha demostrado que cada metro cuadrado de un lote presenta características únicas, demandando manejo diferenciado que responda a esta variabilidad intrínseca. Esta visión exige inversiones planificadas en corto, mediano y largo plazo que equilibren parámetros de rentabilidad, productividad, calidad y sustentabilidad.

La planta posee capacidades metabólicas sorprendentes para absorber no solo nutrientes minerales convencionales sino también compuestos complejos como aminoácidos, ácidos orgánicos, poliamidas y polisacáridos aplicados vía foliar. Esta vía de aplicación se ha convertido en herramienta fundamental para alcanzar metas de rendimiento ambiciosas, complementando de manera estratégica la nutrición radicular.

Experiencias recientes con aplicaciones de 60 kg de urea vía foliar han demostrado resultados impresionantes, proyectándose incrementos a 120-140 unidades de nitrógeno para el siguiente ciclo. Esta evolución en las estrategias de nutrición foliar representa una auténtica revolución en el manejo nutricional que, complementada con inoculaciones de bacterias fijadoras de nitrógeno y otros bioestimulantes, configura un sistema integral donde la precisión temporal y la calidad de los insumos determinan el éxito productivo.

La efectividad de la nutrición foliar depende de una calibración meticulosa que considere múltiples variables técnicas: tamaño de gota, presión de aplicación, cobertura uniforme, selección de boquillas, calidad del agua (pH y dureza), orden de mezclado, condiciones ambientales y horario de aplicación - reconociendo que muchos productos exhiben mayor eficiencia durante aplicaciones nocturnas. Estos factores determinantes exigen un enfoque científico donde la calidad de ejecución prevalece sobre el volumen aplicado, requiriendo adaptación constante a las condiciones particulares de cada lote.

5.4. Fase 4: Cosecha y Mejora Continua (Pasos 15-17)

5.4.1. Preparación y cosecha de calidad

Se debe proceder con la trilla del material a un 15% de humedad. Durante la cosecha es crucial asegurar varios parámetros de calidad. La máquina cosechadora no debe quebrar más del 2% del grano y no debe perder más de 6 a 7 granos por metro cuadrado, equivalente a 25-30 kg por hectárea. Se regula la humedad al 15% considerando que la máquina reduce ligeramente este porcentaje, facilitando la entrega final al 14%. Es fundamental verificar que el espaciamiento funcione correctamente y que la máquina cuente con molino. El cabezal de 70 cm procesa sin problema dos hileras simultáneamente en esta alta densidad de población. El proceso de cosecha se realiza de forma pausada y metódica, evaluando constantemente las pérdidas de grano, la pureza del material cosechado, el porcentaje de grano quebrado y asegurando que los residuos sean cortados lo más bajo posible y distribuidos uniformemente. El objetivo fundamental es ejecutar una cosecha de calidad, priorizando la precisión en cada etapa del proceso.

5.4.2. Análisis económico y agronómico

Tras la cosecha, se debe realizar los cálculos para determinar la calidad de siembra y rentabilidad de la producción. El costo total de producción se encuentra aproximadamente en \$30,000 pesos por hectárea, y en caso de cumplir el objetivo propuesto de 12 toneladas de grano por hectárea sería un costo de \$2,500 por tonelada producida. El precio de venta actual se encuentra aproximadamente en \$5,600 por tonelada, generando ingresos de \$67,200 por hectárea. Resultando en una utilidad neta de \$37,200 por hectárea lo que confirma una rentabilidad del proyecto.

5.4.3. Actualización de metas y reinicio

En base a los resultados del año actual se puede planear de mejor manera el año siguiente, y continuar con el plan de mejoramiento de suelo. Siempre buscando el 100% de reciclaje de material orgánico, mejoramiento del PH, e incrementar el objetivo de rendimiento de cada día.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Con base en el diseño de la metodología de producción esbelta para maíz de alto rendimiento, desarrollada de manera teórica para el predio Las Cruces en Namiquipa, Chihuahua, se establecen las siguientes conclusiones:

- Se logro estructurar una metodología que integra principios de manufactura esbelta y agricultura de precisión. Siendo una metodología técnicamente sólida, pudiendo servir como guía para productores de la región.
- Se determino una fecha optima de siembra mediante el análisis probabilístico de series históricas de la estación climatológica 8059, estableciendo la fecha de siembra el 25 de mayo con un nivel de confianza del 90% respecto a la ausencia de heladas posteriores.
- Selección de un híbrido mediante el análisis de 22 híbridos de cinco compañías, descartando aquellos con un ciclo largo o densidades bajas. El híbrido ASGROW RX-860 resultó el más adecuado por su ciclo corto (115-120 días) y su tolerancia a altas densidades, lo que permite alcanzar el rendimiento objetivo de 12 t/ha con un margen de seguridad del 20%.

- El análisis de suelo del predio reveló un pH de 5.7 (ligeramente ácido), materia orgánica baja, textura franco-arenosa, y desbalance entre calcio (saturación alta) y magnesio (saturación baja). Con base en estos resultados, se diseñó un plan de corrección que incluye encalado con cal dolomítica (2,000-3,000 kg/ha) o sulfato de magnesio (80 kg/ha), incorporación de 10 t/ha de composta, y la práctica de reciclar el 100% de los residuos de cosecha.
- Utilizando los coeficientes de extracción por tonelada de grano derivados de los estudios de Ciampitti et al. (2013) y Borges et al. (2009), se calcularon los requerimientos totales para 12 t/ha: 300 kg N, 132 kg P₂O₅, 228 kg K₂O, 66 kg Mg, 30 kg S, 2.22 kg Zn, 0.53 kg Mn, 0.23 kg Cu y 0.11 kg B. Se diseñó un programa de fertilización fraccionado en cinco etapas (presiembr, siembra, V6-V8, V10-V12, R1), sincronizado con los picos de absorción de cada nutriente, priorizando la eficiencia y reduciendo pérdidas por lixiviación en suelos arenosos.
- Se establecieron dos procedimientos secuenciales compatibles: primero un tratamiento químico-bioestimulante (fungicidas, insecticidas, aminoácidos, algas) que puede aplicarse con días o semanas de anticipación; luego, inmediatamente antes de la siembra, una inoculación con microorganismos benéficos (*Azospirillum brasilense* y *Pseudomonas fluorescens*). Esta separación evita la incompatibilidad entre productos químicos y microorganismos vivos.
- Se diseñó un protocolo para la inoculación de residuos postcosecha con productos Syngenta (Taegro®, Costar®, VIVA®), los cuales aceleran la mineralización, controlan patógenos y mejoran la estructura del suelo. Se enfatizó la incorporación inmediata de los residuos mediante rodillos para proteger la viabilidad de los microorganismos fotosensibles.
- Al no haberse implementado en campo, no fue posible medir indicadores reales de rendimiento, eficiencia de uso de nutrientes, reducción de pérdidas postcosecha, ni el retorno económico. Tampoco se validó la respuesta de los híbridos seleccionados a las condiciones climáticas reales del ciclo 2026. Por lo

tanto, las conclusiones se limitan al diseño metodológico y a la coherencia teórica del mismo.

- La principal contribución de este proyecto es la integración de principios de ingeniería industrial (manufactura esbelta, estandarización, mejora continua) con conocimientos agronómicos actualizados (fisiología del maíz, nutrición vegetal, microbiología del suelo, análisis de riesgos climáticos) en una metodología práctica y escalable. Este enfoque multidisciplinario representa una innovación para el sector agrícola en México, donde predominan las prácticas empíricas y la fragmentación técnica.

6.2. Recomendaciones

Derivado del diseño teórico y las limitaciones identificadas, se formulan las siguientes recomendaciones para futuras fases de investigación y aplicación práctica:

- Validación en campo. Se recomienda implementar la metodología completa durante el ciclo primavera-verano 2026 en el predio Las Cruces, respetando estrictamente la fecha de siembra del 25 de mayo, la densidad de 78,000 semillas/ha, y los protocolos de fertilización fraccionada. Es fundamental medir y registrar al menos los siguientes indicadores: rendimiento real (t/ha), peso de mazorca (g), humedad del grano a cosecha, eficiencia de uso de nitrógeno (NUE), evolución del pH y materia orgánica del suelo, y costos reales de producción.
- Monitoreo climático y ajuste de riesgos. Dado que el análisis climático se basó en datos históricos hasta 2024, se recomienda monitorear en tiempo real las temperaturas durante el ciclo 2026 y comparar las predicciones con lo realmente ocurrido. Si las temperaturas superan consistentemente los 35°C, se deberá evaluar un desplazamiento de la fecha de siembra hacia el 4 de junio (día 155), como se planteó teóricamente.

- Análisis de suelo y ajuste de dosis. Previo a la siembra de 2026, se debe realizar un nuevo muestreo de suelo para actualizar los valores de pH, materia orgánica, CIC y nutrientes. Con base en esos resultados, ajustar las dosis de cal dolomítica o sulfato de magnesio, así como la fertilización nitrogenada.
- Uso de tecnologías de agricultura 4.0. Aunque en el proyecto solo se planteó teóricamente, se recomienda implementar sensores IoT de bajo costo para humedad del suelo y temperatura ambiental, así como un dron agrícola para la aplicación de herbicidas y fertilizantes foliares. Esto permitirá generar datos objetivos para la mejora continua.
- Registro de lecciones aprendidas. Al final del ciclo 2026, se debe realizar un análisis económico-agronómico completo (costo por tonelada, relación beneficio-costos, punto de equilibrio, causas de mermas). Estas lecciones servirán para actualizar la metodología y reiniciar el ciclo con metas más ambiciosas.
- Transferencia a pequeños productores. Una vez validada la metodología, se recomienda diseñar una versión simplificada y de bajo costo para pequeños productores, adaptando los pasos a sus recursos limitados, pero conservando los principios esenciales: análisis de suelo básico, encalado, reciclaje de residuos, tratamiento de semilla y fraccionamiento de la fertilización.
- Finalmente, se recomienda que este trabajo no concluya con la entrega de la tesis, sino que sirva como punto de partida para una línea de investigación-acción en la región de Namiquipa. La mejora continua (Paso 17 de la metodología) implica que cada ciclo debe ser mejor que el anterior, construyendo fertilidad de suelo año tras año.

1. REFERENCIAS

- A. Kumar, S. K. (2019). Fatigue analysis of automotive components using damage accumulation models. *SAE Technical Paper Series*.
- Abhiram, G. G. (2025). Enhancing sustainability in sugarcane production through effective nitrogen management: A comprehensive review. *Nitrogen*, 6(3).
- Andreou, M. (18 de 01 de 2024). *Corn supremacy: the power of the Mexican maize crop*. Obtenido de University of Sussex: <https://blogs.sussex.ac.uk/global/2024/01/18/corn-supremacy-the-power-of-the-mexican-maize-crop/>
- Armendáriz, A. G. (2025). Prácticas alimentarias en una comunidad rarámuri de la Sierra de Chihuahua, México. *Anthropology of food*, 18.
- Barbieri, P. E. (2012). Maize evapotranspiration and water-use efficiency in response to row spacing. *Agronomy Journal*, 104(4), 939-944.
- Barraza-Contreras, J. M.-M. (2022). Random Vibration Fatigue Analysis Using a Nonlinear Cumulative Damage Model. *Applied Sciences*, 9(4310), 12.
- BC, Y. (2007). Microbial biomass and activity in alkalized magnesian soils under arid conditions. *Soil Biol. Biochem*, 39, 3004-3013.
- Borges, I. D. (2009). Micronutrients accumulation at different maize development stages. *Ciência e agrotecnologia*, 33, 1018-1025.
- Bridges, E. M. (2024). Processes of soil formation. En E. M. Bridges, *Handbook of Processes and Modeling in the Soil-Plant System* (pág. 121'148). CRC Press.
- Chandra, R. S. (2021). Comparison of statistical software tools in reliability engineering. En *International Journal of Reliability and Safety* (Vol. 12, págs. 321-334).
- Ciampitti, I. A. (2013). Maize nutrient accumulation and partitioning in response to plant density and nitrogen rate: II. Calcium, magnesium, and micronutrients. . *Agronomy Journal*, 105(6), 1645-1657.
- Ciesielski, H. S. (1997). A comparison between three methods for the determination of cation exchange capacity and exchangeable cations in soils. *Agronomie*, 17(1), 9-16.

- CIMMYT. (20 de April de 2020). *Buscan maíz nativo que brinde seguridad alimentaria en la Sierra Tarahumara*. Obtenido de CIMMYT: <https://www.cimmyt.org/es/noticias/buscan-maiz-nativo-que-brinde-seguridad-alimentaria-en-la-sierra-tarahumara/>
- Coppola, A. (1984). *Reliability Engineering: Theory and Practice*. Springer.
- Day, A. D. (1993). Soil Acidity. In: Plant Nutrients in Desert Environments. 31-33.
- Del Duca, S. T. (2025). Comparison of LUCAS and Italian Sampling Procedures for Harmonising Physicochemical and Biological Soil Health Indicators. *European Journal of Soil Science*, 76(3).
- DGSIAP. (11 de August de 2025). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Obtenido de Gobierno de Mexico web site: https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- DGSIAP. (3 de August de 2025). *Avance de Siembras y Cosechas*. Obtenido de Gob.mx: https://nube.agricultura.gob.mx/avance_agricola/
- Dhillon, B. S. (2006). En *Applied Reliability and Quality: Fundamentals, Methods and Procedures*. Springer.
- Djaman, K. D. (2024). Plant nutrient removal and soil residual chemical properties as impacted by maize planting date and density. *PLOS ONE*. Obtenido de <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299193>
- Durán Zuazo, V. H. (2014). Impacto de la erosión y escorrentía en laderas de agroecosistemas de montaña mediterránea. *Ecosistemas*, 23(1), 66-72.
- Ebeling, C. E. (2019). *An introduction to reliability and maintainability engineering*. Waveland Press.
- Ebeling, W. (2010). En *Reliability and Maintainability Engineering*. McGraw-Hill.
- Echavarria-Chairez, F. G.-S.-P.-G.-F. (2023). Acumulación y pérdida de suelo por erosión eólica en el norte de Zacatecas. *Terra Latinoamericana*, 41.
- Falen, C. (24 de February de 2025). *The Hidden Costs of Soil pH Imbalance and Nutrient Stratification*. Obtenido de ICL Growing Solutions: <https://icl-growingsolutions.com/en-us/agriculture/knowledge-hub/the-hidden-costs-of-soil-ph-imbalance-and-nutrient-stratification/>

- FAO. (2 de July de 2025). *Base de datos estadísticos corporativos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Figueroa Cárdenas, J. D. (2013). Propiedades físicas del grano y calidad de los grupos raciales de maíces nativos (criollos) de México. *Revista fitotecnica mexicana*, 36, 305-314.
- Fukumasu, J. J. (2024). Links between soil pore structure, water flow and solute transport in the topsoil of an arable field: Does soil organic carbon matter?. *Geoderma*.
- Ganesh, S. &. (2024). Transcriptomic profiling reveals the mechanisms of Trichoderma-induced growth promotion in groundnut seedlings. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 30(2), 311-326.
- Gobierno De Mexico. (11 de 8 de 2025). *Información Estadística Climatológica*. Obtenido de Conagua Gobierno de Mexico: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Harman, G. E. (2006). Overview of Mechanisms and Uses of Trichoderma spp. *Phytopathology*, 96(2), 190-194.
- Haro, L. (s.f.). *Far from corn self-sufficiency*. Obtenido de El Sol de México: <https://www.elsoldemexico.com.mx/analisis/lejos-de-la-autosuficiencia-de-maiz-11759525.html>
- Hermans, C. H. (2006). How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation? *Trends in plant science*, 11(2), 610-617.
- Hermesen, E. J. (21 de 4 de 2023). *Cultural history of maize*. Obtenido de Evolution Heart Home: <https://evolution.earthathome.org/grasses/andropogoneae/maize-culture/>
- Hinsinger, P. B. (2009). Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. *Springer*, 321, 117-152.
- Ibarra, E. S. (2021). Déficit hídrico en maíz al considerar fenología, efecto en rendimiento y eficiencia en el uso del agua. *Agrociencia*, 55(3), 209-226.

- Ignacio A. Ciampitti, J. J. (2013). Maize Nutrient Accumulation and Partitioning in Response to Plant Density and Nitrogen Rate: I. Macronutrients. *Crop Ecology & Physiology*, 13.
- InfoAgronomo. (7 de 12 de 2024). *Fases y Etapas fenológicas del maíz*. Obtenido de InfoAgronomo: <https://infoagronomo.net/etapas-fenologicas-del-maiz/>
- Jacoby, R. P. (2017). The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition—current knowledge and future directions. *Frontiers in plant science*, 8.
- Jansson, J. K. (2018). The soil microbiome—from metagenomics to metaphenomics. *Current opinion in microbiology*, 43, 162-168.
- Jiménez-Ballesta, R. P.-d.-l.-R.-M.-N. (2024). Delineating the significance of sharp boundaries between horizons and their synergetic linkage in calcareous vineyard soils. *Discover Applied Sciences*, 6.
- Johnson, D. L. (2024). Soil-Forming Factors. En D. L. Johnson, *The Soils of Mississippi* (págs. 21-37). Springer Nature Switzerland.
- Kabala, C. &. (2024). Comparison of cation exchange capacity extraction methods for soil data harmonization and soil classification in Central and East Europe. *Geoderma*, 450.
- Kececioglu, D. (2003). En *Reliability Engineering Handbook*. Prentice Hall.
- Kumar, R. &. (2025). Mapping and evaluation of soil macronutrient and micronutrient status in Muzaffarnagar district of India. , *23*(1). *Pantnagar Journal of Research*, 23(1), 17.
- Liu, J. Z. (2024). Biochar's dual impact on soil acidity management and crop yield enhancement: a meta-analysis.
- Lugtenberg, B. &. (2009). Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual Review of Microbiology*, 63, 541-556.
- Lugtenberg, B. &. (2009). Plant-growth-promoting rhizobacteria. Annual review of microbiology. 63(1), 541-556.
- MathWorks. (s.f.). *Reliability Toolbox for MATLAB*. Recuperado el 24 de 11 de 2024, de <https://www.mathworks.com>

- Mundial, G. B. (3 de 8 de 2025). *Consumo de Fertilizantes - Mexico*. Obtenido de Grupo Banco Mundial:
<https://datos.bancomundial.org/indicador/AG.CON.FERT.PT.ZS?locations=MX>
- Nordt, L. S. (2025). Soil Taxonomy adapted to buried paleosols: First approximation. *Earth-Science Reviews*, 266.
- Nordt, L. S. (2025). Soil Taxonomy adapted to buried paleosols: First approximation. , 266, 105141. *Earth-Science Reviews*, 266.
- Ofoe, R. T.-P. (2023). Aluminum in plant: Benefits, toxicity and tolerance mechanisms. *Frontiers in plant science*, 13.
- Olivas-Tarango, A. L.-B.-R. (2024). Rendimiento, Calidad de Nuez y Alternancia en Nogal Pecanero, como Respuesta a la Aplicación de Quelatos de Zinc en un Suelo Alcalino. *Terra Latinoamericana*, 42.
- Philippot, L. R. (2013). Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. *Nature reviews microbiology*, 11(11), 789-799.
- Philippot, L. R. (2013). Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. . *Nature reviews microbiology*, 11(11), 789-799.
- Piña-Monarez, M. R. (2019). Weibull Analysis for Normal/Accelerated and Fatigue Random Vibration Test. *Quality and Reliability Engineering International*, 35, 1-21.
- Preciado-Guzmán, J. F.-S.-P.-C.-A.-H. (2024). Methods Comparison for Cation Exchange Capacity and Exchangeable Cations of Soils. *Terra Latinoamericana*, 42.
- ReliaSoft Corporation. (2020). En *Weibull++: Life Data Analysis Reference Book*. ReliaSoft.
- Rengasamy, P. (2006). World salinization with emphasis on Australia. . *Journal of Experimental Botany*, 57(5), 1017-1023.
- Richardson, A. E. (2011). Soil microorganisms mediating phosphorus availability. *Plant Physiology*, 156(3), 989-996.
- Rural, S. d. (14 de March de 2023). *Razas de maíz, riqueza del campo mexicano*. Obtenido de Gobierno de Mexico: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/130549>

- Rusoci, N. E. (2023). Maíz en San Luis. Efecto de fecha y densidades de siembra sobre el rendimiento y sus componentes ecofisiológicos. *INTA Ediciones*.
- Santander, J. S. (2024). Physicochemical characterization of agricultural soils under a traditional system in the Mezquital Valley, Hidalgo. *South Florida Journal of Development*, 5(5), 1-12.
- Shah, M. V. (2024). Transforming Soil Stability: A Review on Harnessing Plant Cell Compounds and Microbial Products for Modifying Cation Exchange Capacity. *Nature Environment and Pollution Technology*, 23(4), 1957-1971.
- Suresh, S. (1998). En *Fatigue of Materials* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Tadayonnejad, M. &. (2024). The Impact of Conservation Tillage Systems on Soil Pore Size Distribution and Hydraulic Properties Under Saline Conditions and Barley-Safflower Rotation. *Journal of Soil and Plant Interactions*, 15(4), 79-97.
- Tawfeeq, S. M. (2025). Impact of Crop Residue Burning on Soil Properties, Microbial Activity, and CO₂ Emissions. *Applied and Environmental Soil Science*, 2025(1).
- The National Committee on Soil and Terrain . (2024). Appendix 3. En T. N. Terrain, *Australian Soil and Land Survey Field Handbook* (pág. 228).
- Torres, G. M. (2017). Seed-oriented planting improves light interception, radiation use efficiency and grain yield of maize (*Zea mays* L.). *Experimental Agriculture*, 53(2), 210-225.
- Universidad Nacional de Tucumán. (19 de 8 de 2025). *Medios UNT*. Obtenido de <https://medios.unt.edu.ar/2025/08/19/una-investigacion-tucumana-revela-el-dano-oculto-de-la-quema-de-canaverales/>
- USDA. (3 de 8 de 2025). *Foreign Agricultural Service*. Obtenido de USDA.gov: <https://www.fas.usda.gov/regions/mexico>
- Van Der Heijden, M. G. (2008). The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology letters*, 11(3), 296-310.
- Wang, R. D. (2017). Base cations and micronutrients in soil aggregates as affected by enhanced nitrogen and water inputs in a semi-arid steppe grassland. *Science of the total environment*, 575, 564-572.

- Weibull, W. (1939). *A Statistical Theory of the Strength of Materials*. Ingeniörs Vetenskaps Akademien Handlingar.
- Wenyika, P. E. (2025). Effects of liming on soil physical and chemical properties in Europe and North America: A review. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 8(3).
- Worku, W. (2020). Performance, radiation capture and use by maize–mungbean–common bean sequential intercropping under different leaf removal and row orientation schemes. *Experimental Agriculture*, 56(5), 752-766.
- Xu, Z. Z. (2025). Mitigation of soil acidification is critical for reducing GHG emission and improving soil quality, crop yield and farm economic benefits: evidence from a global meta-analysis. *Field Crops Research*, 322.
- Yang, A. F. (1998). Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials. En *International Journal of Fatigue* (Vol. 20, págs. 9-34).
- Yousuf, M. T. (2025). Phase Interactions En Z. Y. Tian (Ed.), *Environmental Phase Chemistry and Dynamics* (Capítulo 4). Springer Nature Singapore. En M. T. Yousuf, *Environmental Chemistry: Advanced Concepts and Applications* (págs. 67-79). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Zhou, L. e. (2025). Influence of altitudinal zones on soil nutrient dynamics and fertility constraints in agricultural terrains of Yunnan, China. Directory of Open Access Journals. *Scientific Reports*, 15(1), 1-22.