



**XX**  
Conferencia  
Internacional sobre  
20th International Oil Palm Conference

**PALMA  
DE ACEITE**

**EL PODER TRANSFORMADOR  
DE LA PALMA DE ACEITE**

## **IA RFF**

Calificación de racimos de fruta fresca usando tecnologías de Inteligencia Artificial y Espectroscopía NIR.  
(en etapa de investigación)



**XX**  
Conferencia  
Internacional sobre  
20th International Oil Palm Conference

**PALMA  
DE ACEITE**

**EL PODER TRANSFORMADOR  
DE LA PALMA DE ACEITE**



**Cesar Augusto Díaz Rangel**

Investigador Asociado

Programa de Procesamiento

**Jesús Alberto García Núñez**

Investigador titular

Programa de Procesamiento

# Objetivos y alcances

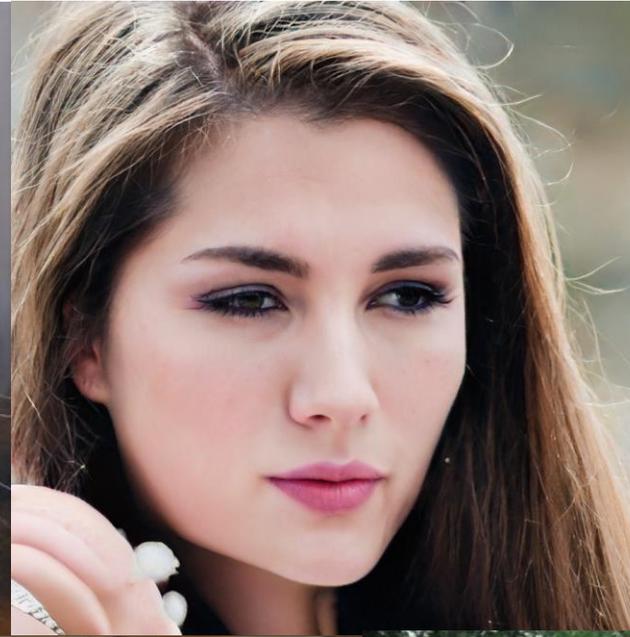
## Objetivo general:

- Desarrollar tecnologías para optimizar la calificación de RFF dada la alta subjetividad y baja representatividad de los métodos actuales.

## Alcances:

- Desarrollo de equipos para planta de beneficio y para plantación.
- Entrenamiento y desarrollo de modelos de predicción a partir de criterios de maduración, inicialmente verde para racimos *E. guineensis*.
- Caracterización espectral del fruto en función del grado de madurez a través de tecnologías espectrales tipo NIR.

# ¿Qué tienen en común?



# Algunas definiciones

## Red neuronal

Es una estructura funcional basada en algoritmos matemáticos y estadísticos para su funcionamiento. De modo general, una red neuronal recibe información de entrenamiento, se procesa para generar un modelo de inferencia o de predicción, y se produce una matriz de respuesta.

## Aprendizaje autónomo o Machine Learning (ML):

Es el uso más básico de una red neuronal, en donde generalmente se produce como respuesta un vector o escalar. Se usa para solucionar problemas asociados a una única variable, ejemplo: predecir el precio del oro en el tiempo.

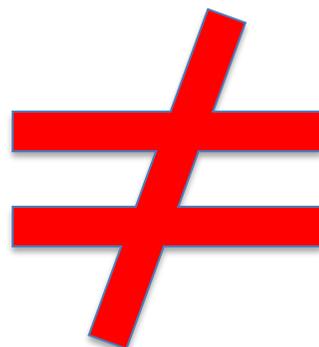
## Aprendizaje profundo o Deep Learning (DL):

El aprendizaje profundo o Deep Learning es el uso específico de ML enfocado a solucionar problemas con diversas variables y condiciones frontera, incluso cambiantes en el tiempo o condiciones caóticas. Se producen generalmente matrices de respuesta, en algunos casos con retroalimentación y reentrenamiento para minimizar el error.

## Modelo de inferencia:

Una vez la red neuronal ha terminado de entrenarse a partir de información previamente etiquetada cuantitativa o cualitativamente por una persona, se genera como resultado un modelo matemático que por medio de indicadores estadísticos monitorea las predicciones que empezará a realizar a partir de datos nuevos que no estuvieron dentro del entrenamiento (validación).

# Adivinar NO es Predecir ni Pronosticar

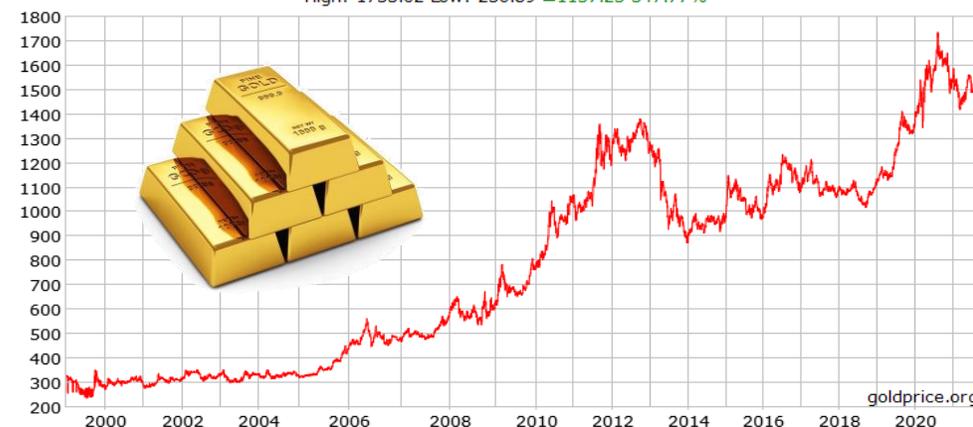


## Adivinar...

Más emocional, no tiene soporte técnico, ni estadístico, ni científico... Brujos, chamanes, etc

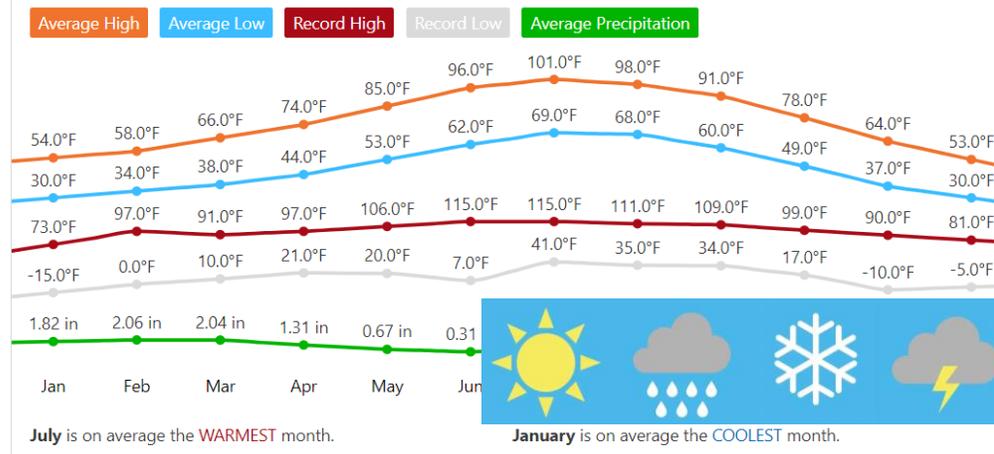
## Predicción del valor del oro en el tiempo (proyección sobre histórico)

All Data Gold Price in EUR/oz High: 1733.02 Low: 236.89 ▲1157.23 347.77% Last Close: 1489.99

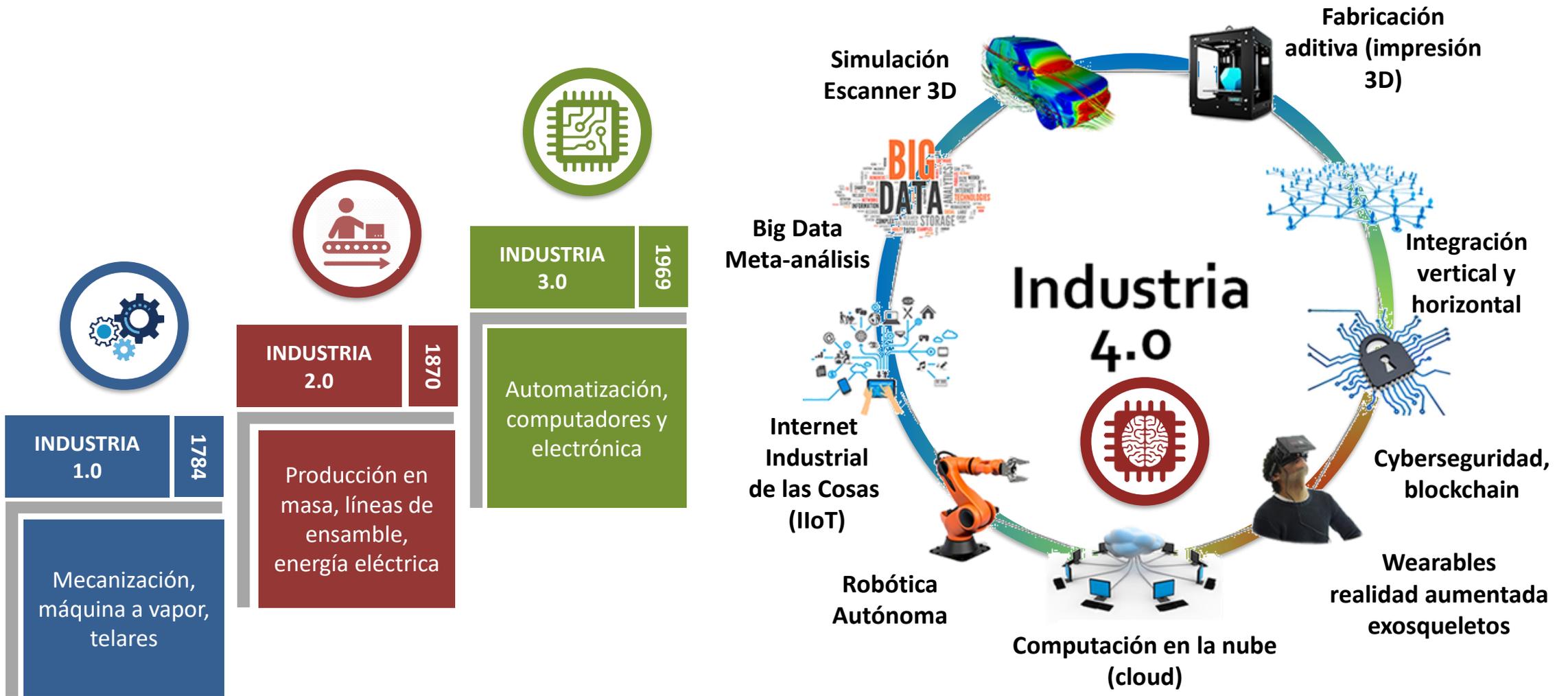


Friday, September 24, 2021

## Pronóstico del clima (múltiples variables, históricos, escenarios, etc)

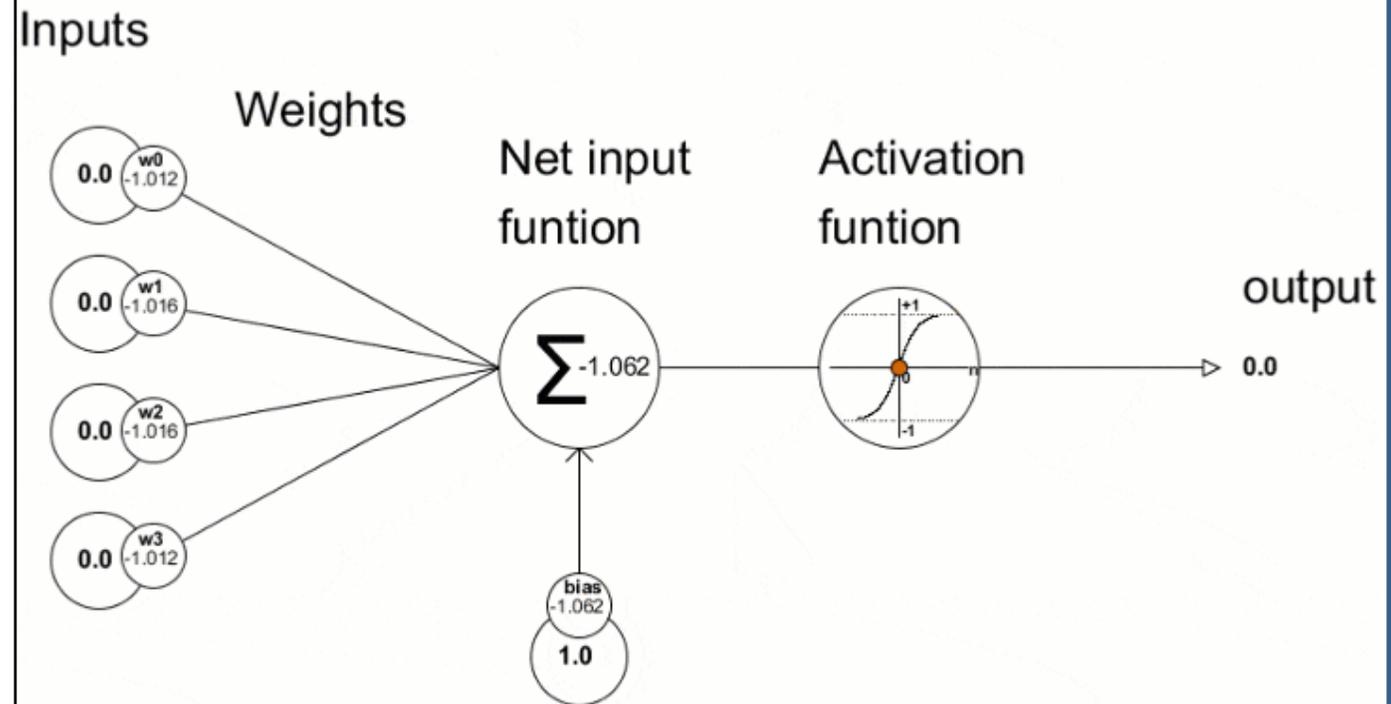
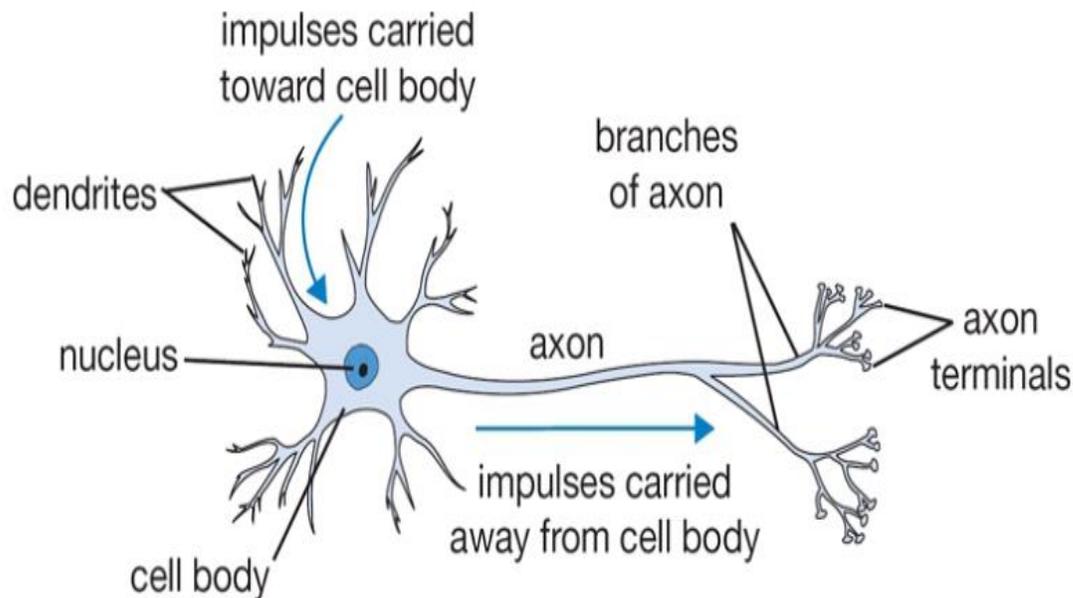


# Evolución hacia la Industria 4.0



# Unidad básica de funcionamiento en redes neuronales

## Neurona biológica y el homólogo digital de red neuronal artificial



Fuente: Conceptual map of data science. Mayo, M. (2016, March). *Data science puzzle explained/2*. Tomado de <http://www.kdnuggets.com/2016/03/data-science-puzzle-explained.html/2>. Noviembre 2018.

# Tipos de redes neuronales

## Machine Learning & Deep Learning

Aprendizaje Supervisado

Aprendizaje No Supervisado

Aprendizaje  
Reforzado

Clasificación

Regresión

Clusterización

Máquinas  
soporte vectorial

Análisis  
discriminante

Bayes Naive

K vecinos más  
próximos

Redes  
Neuronales

Regresión lineal  
GLM

SVR, GPR

Métodos de  
ensamble

Arboles de  
decisión

Series de tiempo

K-Means, K-  
Medoids, Fuzzy C-  
Means

Agrupamiento  
jerárquico

Mezcla Gaussiana

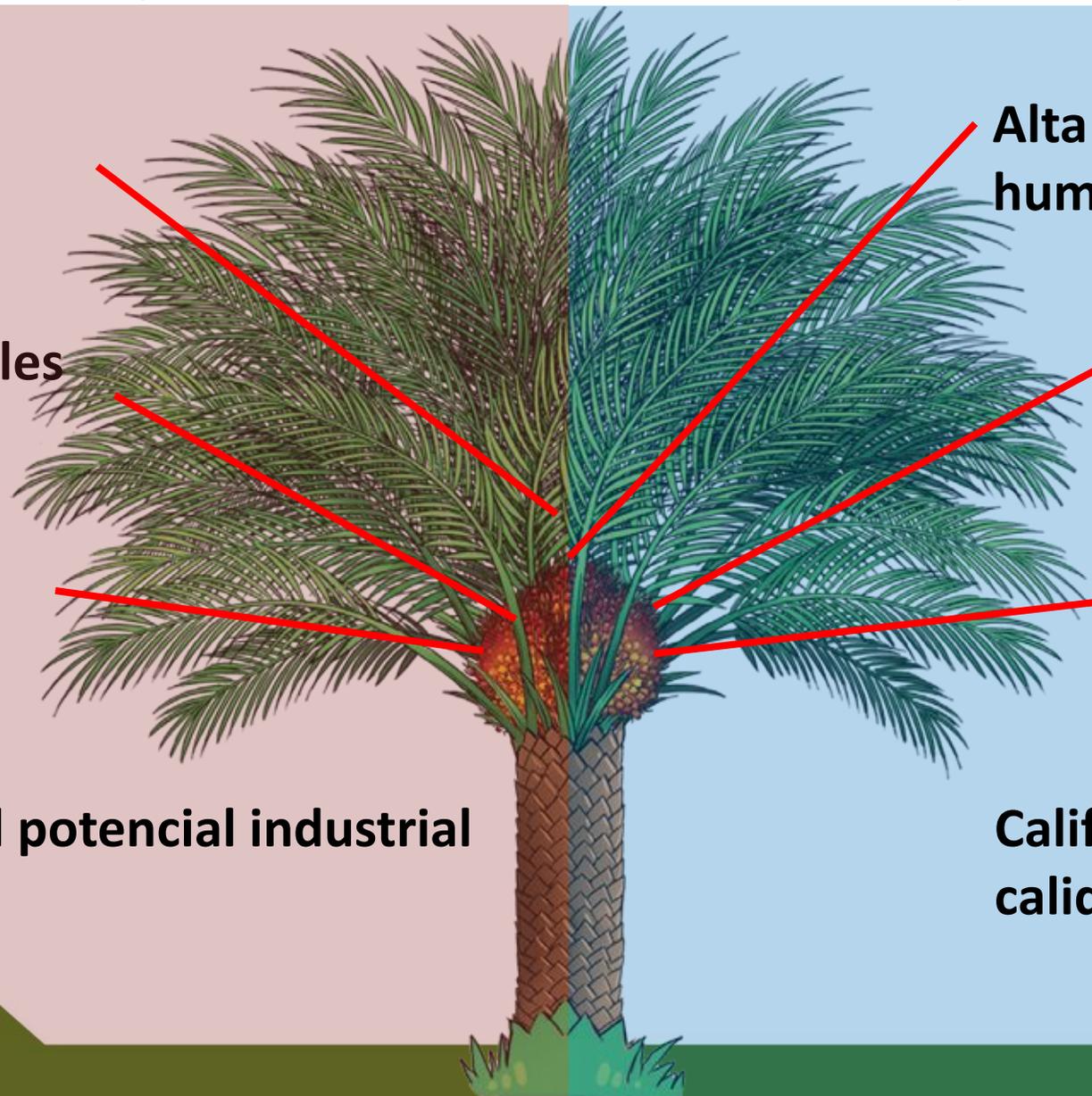
Modelo oculto  
Markov

Redes  
Neuronales



# Grandes retos de la productividad:

## ¿Cómo conocer el potencial industrial de aceite y la calidad de RFF?



Tamaño de muestra  
insuficiente

Métodos convencionales  
imprecisos

Alta variabilidad por  
cultivar y  
temporalidad

Alta subjetividad  
humana

Comunicación  
deficiente entre PBs  
y plantaciones.

Métodos de pago a  
proveedores con  
alta incertidumbre



Medición del potencial industrial  
de aceite

Calificación de  
calidad de RFF





**Seguir haciendo lo mismo para lograr algo distinto...**

**Aprender y confiar en la inteligencia artificial...**

# “Las mujeres pueden ver hasta 100 veces más colores que los hombres”



Representatividad de los métodos actuales

Escala fenológica (madurez de racimos)

Tamaño

Variabilidad

Subjetividad

Luz disponible para calificar

condiciones agroclimáticas

formación de los racimos

lagunas y heladas

## Métodos convencionales

- Criterios diferenciados por cultivares (E. guineensis e Híbridos OxG)
- Metodología de análisis de al menos 30 racimos por viaje usando cuerda con nudos
- Estimación visual con base en apreciación por parte de operador en planta de beneficio o personal en cosecha.

# Criteria de calificación entre cultivares

## Elaeis guineensis

## Híbridos OxG

**Verde**  
0 alvéolos vacíos



Referencia: 0%  
racimos verdes

**Maduro**

Desde 3 frutos hasta el 50% de frutos externos desprendidos naturalmente. Deshidratación parcial del pedúnculo



Referencia: mínimo 90% de racimos maduros

**Sobremaduro**

Más del 50% de frutos externo desprendidos naturalmente. Deshidratación parcial del pedúnculo



Referencia: mínimo 10% de racimos sobremaduros

**Podrido**

Más del 50% de frutos externos desprendidos. Deshidratación total y ablandamiento del pedúnculo. Olor fétido, evidencia de descomposición



Referencia: 0% racimos podridos

**Pedúnculo largo**

Longitud pedúnculo > 5 cm



Referencia: 0% racimos

## Identifique los criterios de calidad en tolva para racimos de fruto de palma de aceite en cultivares híbridos OxG

**CRITERIO POR ESTADO DE MADURACIÓN**

<b>Immatura</b> Se caracterizan por el empesamiento de los alvéolos.	<b>Maduro</b> Empesamiento óptimo. 10 frutos maduros y 25% en su punto óptimo. Puntos amarillos o en su punto óptimo.	<b>Sobremaduro</b> Empesamiento excesivo. 25% frutos 50% en su punto óptimo. 25% frutos amarillos o en su punto óptimo.	<b>Podrido y tusas viejas</b> Empesamiento excesivo, presencia de tusas y otros frutos. Empesamiento de los frutos en 50% del peso de tusas y frutos.

**CRITERIOS EXTERNOS**

- Impurezas: Paja, piedras, residuos de cosecha, arena, etc.
- Pedúnculo largo: Más de 7 cm por encima de la base de los frutos del racimo.

**CRITERIO POR CONFORMACIÓN**

Entrega de los racimos de acuerdo con el rango de formación de frutos normales y patológicos.

Menos del 50 %		
Entre el 50 y 70 %		
Entre 70 y 90 %		
Igual o mayor al 90 %		

**ENTREGUE A LA PLANTA DE BENEFICIO ESTE TIPO DE RACIMOS**

**Y GÁNESE HASTA EL ÚLTIMO PESO**

Con el apoyo del Fondo de Fomento Palmero

cenipalma

**IDENTIFIQUE CORRECTAMENTE** los mejores racimos para cortar

Saquele todo el aceite a los híbridos

Cultivar **Coari x La Mé**

**807** Estado óptimo de cosecha

- Frutos de color naranja colorado opaco
- Alto empesamiento de frutos dentro del racimo
- Menor peso seco
- Consistencia firme y alta resistencia de frutos al contacto del fruto con los dedos
- Empesamiento natural de 3 a 5 frutos

cenipalma

**IDENTIFIQUE CORRECTAMENTE** los mejores racimos para cortar

Saquele todo el aceite a los híbridos

Cultivar **Cereté x Deli**

**807** Estado óptimo de cosecha

- Frutos de color rojo colorado opaco
- Alto empesamiento de frutos dentro del racimo
- Menor peso seco y de color naranja oscuro
- Consistencia firme y alta resistencia de frutos al contacto del fruto con los dedos
- Empesamiento natural de 10 a 14 frutos

cenipalma

**IDENTIFIQUE CORRECTAMENTE** los mejores racimos para cortar

Saquele todo el aceite a los híbridos

Cultivar **Brasil x Djongo**

**807** Estado óptimo de cosecha

- Frutos de color naranja colorado opaco
- Alto empesamiento de frutos dentro del racimo
- Menor peso seco
- Consistencia firme y alta resistencia de frutos al contacto del fruto con los dedos
- Empesamiento natural de 4 a 10 frutos

cenipalma

**IDENTIFIQUE CORRECTAMENTE** los mejores racimos para cortar

Saquele todo el aceite a los híbridos

Cultivar **Manaos x Compacta**

**807** Estado óptimo de cosecha

- Frutos de color naranja colorado opaco
- Alto empesamiento de frutos dentro del racimo
- Menor peso seco
- Consistencia firme y alta resistencia de frutos al contacto del fruto con los dedos
- Empesamiento natural en un rango entre 5 y 30 frutos

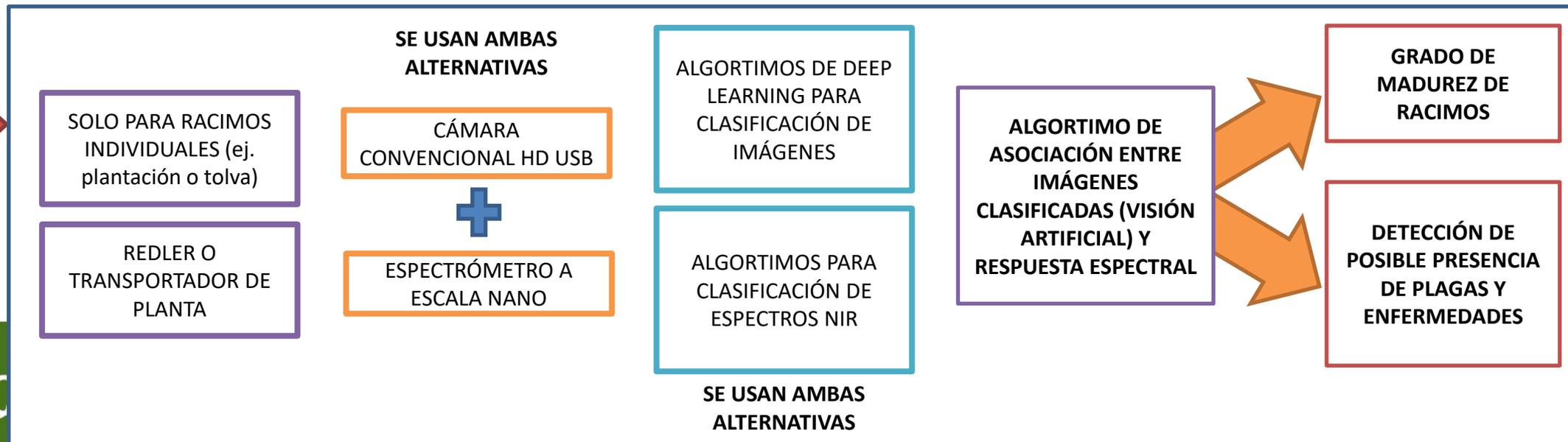
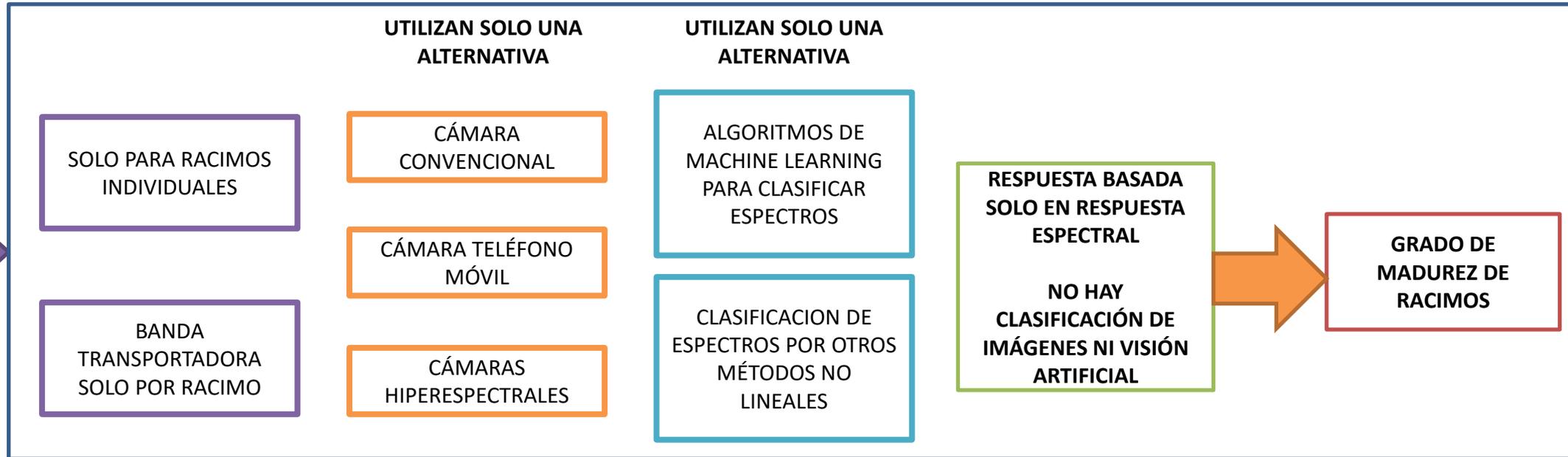
cenipalma

Pedúnculo largo  
Racimos anormales  
Racimos malogros

# Antecedentes y análisis bibliométrico del medio

Otros autores de artículos, prototipos y patentes

RACIMO FRESCO



# Línea de desarrollo del sistema flexible mediante IA para plantas de beneficio

Inventario tecnológico sobre sistemas de identificación y clasificación

Construcción de prototipo con software para Deep Learning

Prototipo 2: mayor poder de procesamiento, autonomía y operatividad

Pre validación de sistema en planta de beneficio



2019

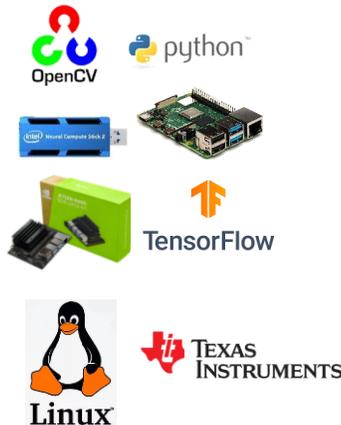
2020

2020

2020

2021

Localización de proveedores y pruebas piloto hardware autónomo off-the-grid



Captura de imágenes y etiquetado de características



Prototipo 1: funcional para identificar RFE, vagonetas, y otros



# Entrenamiento de red neuronal a partir de diversos ambientes

RFF en plantación



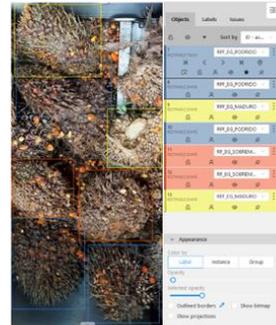
Etiquetado de imágenes plantación



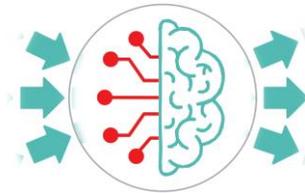
RFF en tolvas de PB



Etiquetado de imágenes en PB



RFF en transportadores



2020

YOLO V4

2021

SSD Mobilenet V2

2022

YOLO V7

Desarrollo de modelos de predicción para uso en equipo portátil (plantación) o para instalación en sitio (PB)



Calificación de racimos con % de probabilidad según:

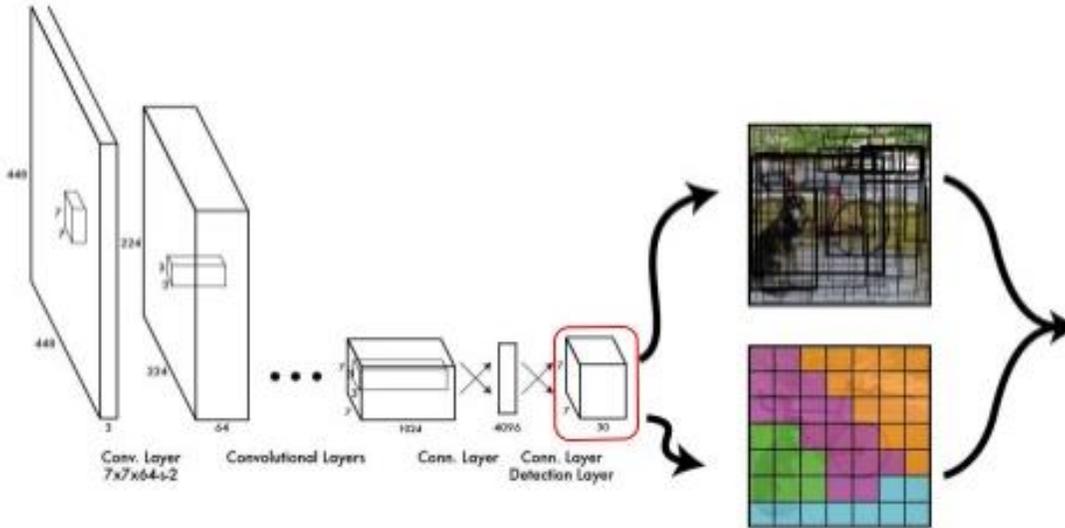
- Localización dentro del proceso (racimos frescos, racimos esterilizados o racimos desfrutados)
- Tipo de cultivar (inicialmente *E. guineensis*)
- Madurez:
  - **Inmaduro o verde (actual)**
  - Sobremaduro
  - Podrido
  - Pedúnculo largo
  - Malformado
- Detección de determinados elementos antagonistas de la palma en plantación:
  - Insecto raspador *Demotispa N.*
  - Deficiencias nutricionales

# Modelo YOLO (You Only Look Once) para clasificación según etiquetado previo (red CNN)



Imágenes organizadas por cultivares/materiales

Características: tipo de cultivar y grados de madurez (*E. guineensis*)



Capas de convolución de matrices de imágenes vectorizadas

1. Pre procesamiento de imágenes (filtros RGB, brillo)

2. La imagen se divide en regiones para predecir cuadros de identificación y probabilidad (regresión lineal)

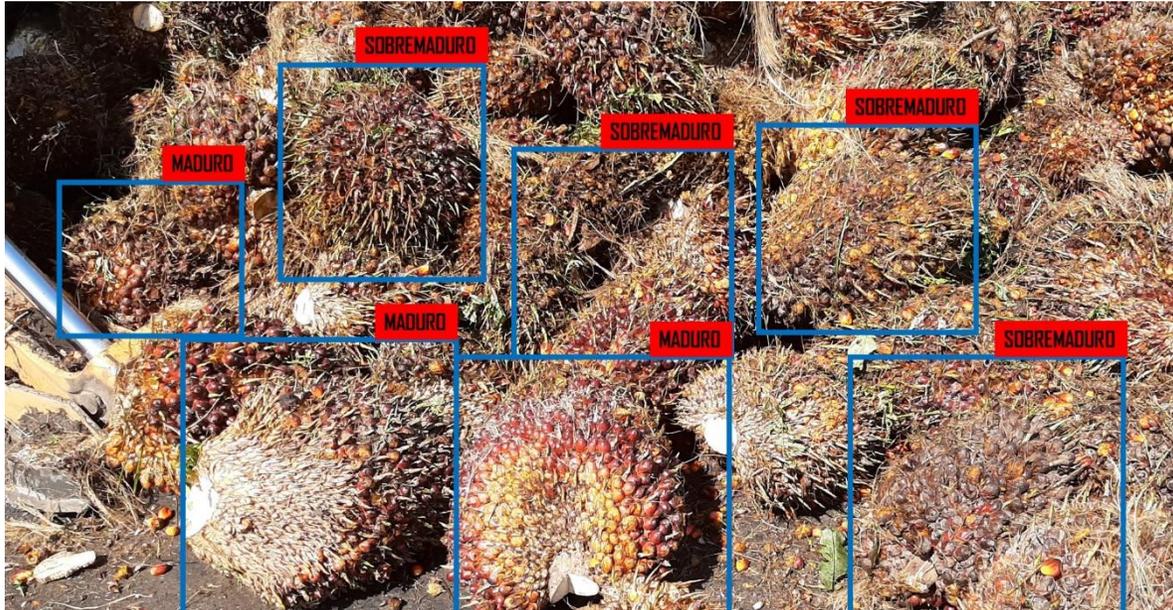
3. Los cuadros o cajas se ponderan a partir de probabilidades predichas

4. Se predicen probabilidades de cada característica y las coordenadas, normalizando altura y ancho de imagen

5. Función de activación usando RMSE para optimizar respuesta final (rectángulo con % probabilidad)

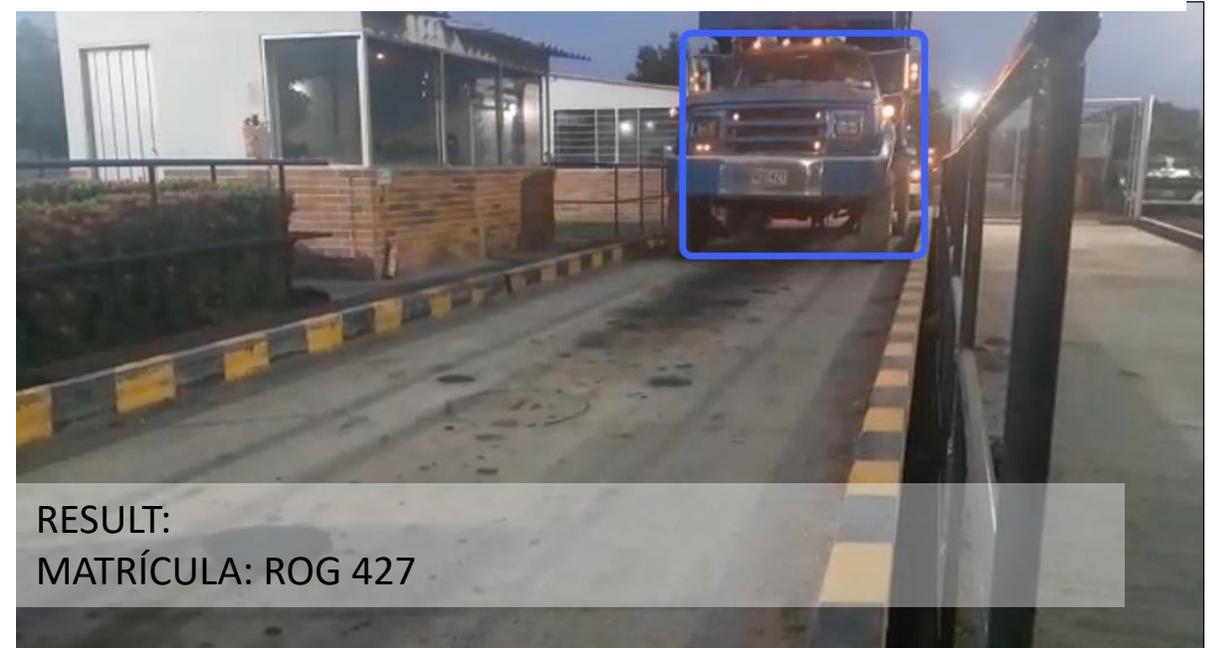
# Validación preliminar de sistema de identificación en planta de beneficio

Identificación de RFF según criterios para E. Guineensis  
Identificación sobre imagen capturada



Criterio calificación RFF	Eficiencia de entrenamiento	Error durante entrenamiento
Verde	77 %	0,50
Maduro	89 %	0,05
Sobre maduro	74 %	0,91
Podrido	58 %	0,97
Pedúnculo largo	62 %	0,87
Malformado	67 %	0,82

Identificación de matrículas, vehículos y personas  
Identificación sobre video en línea



Vehículos

Eficiencia entrenamiento = 77 %  
Error entrenamiento < 0,5 %

Matrículas (placas)

Eficiencia entrenamiento = 89 %  
Error entrenamiento < 0,5 %

Personas

Eficiencia entrenamiento = 87 %  
Error entrenamiento < 0,5 %

# Detección de vagonetas en movimiento y su numeración

SSD Mobilenet-V2 configuración 1

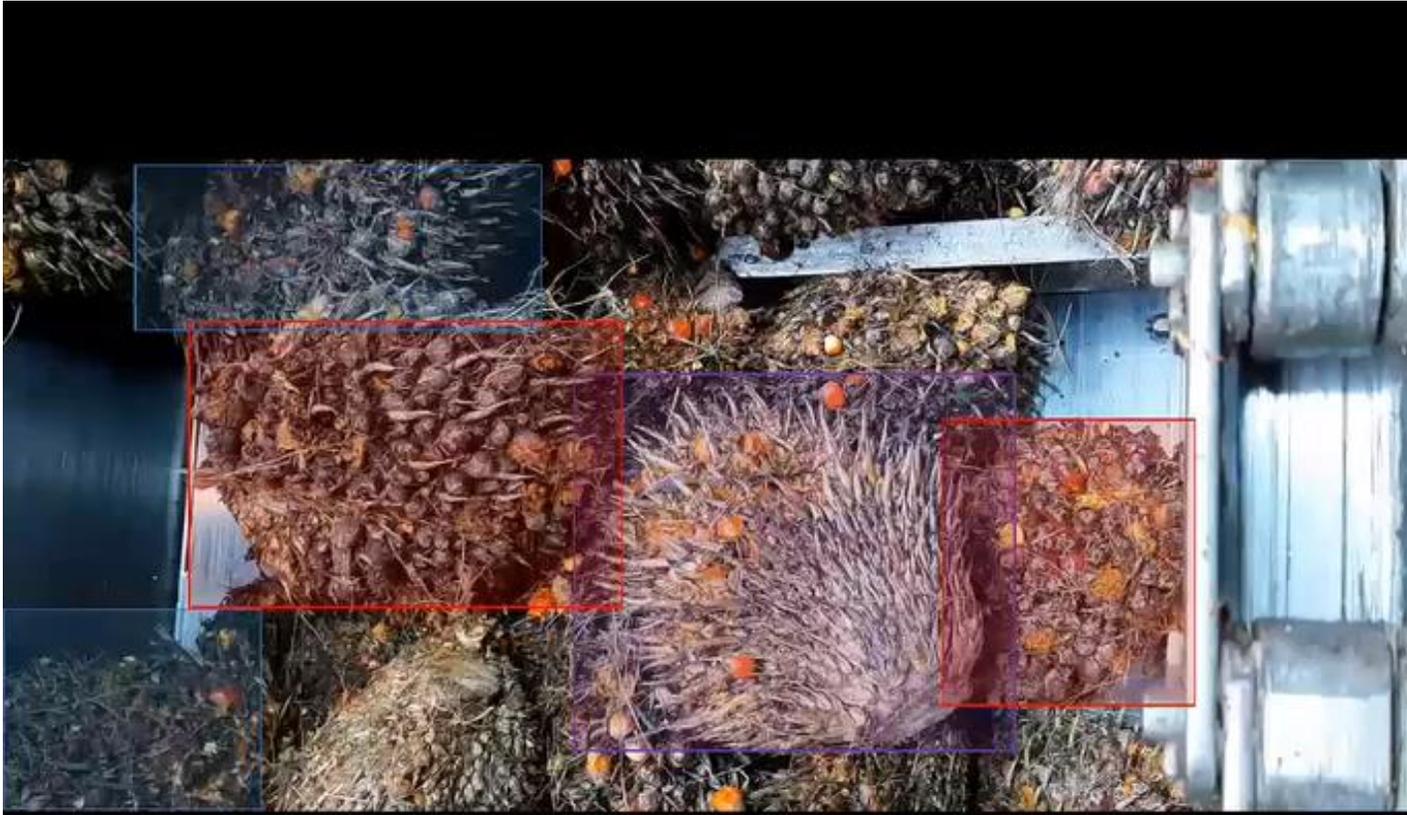


SSD Mobilenet-V2 configuración 2



Identificación de vagonetas	Eficiencia de detección	Error de convergencia durante entrenamiento	FPS Promedio
Vagoneta	81 %	0,30	45
Número arriba	79 %	0,05	39
Número abajo	89 %	0,05	35

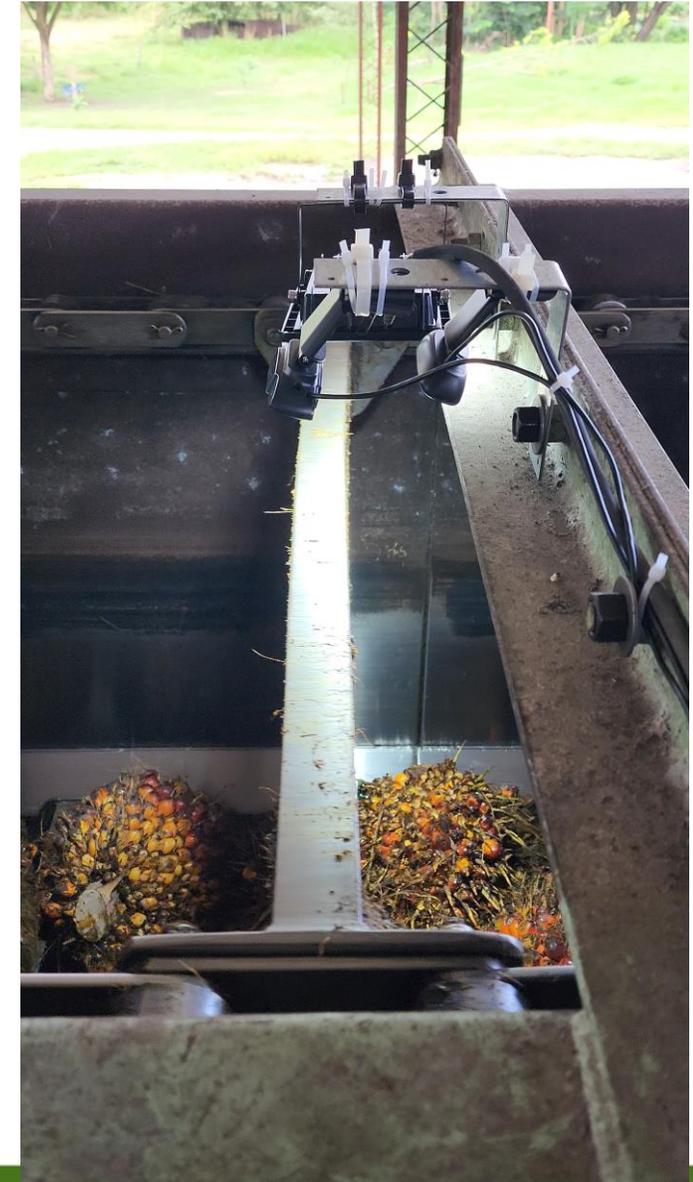
# Comparación de resultados entre métodos para calificación de racimos



CALIFICACIÓN EN TOLVA POR MÉTODO CONVENCIONAL (NUDOS)	
<b>RFF de muestra por método</b>	<b>30 (1,6% del total de la superficie del viaje)</b>
Verde	5,0 %
Maduro	77,5 %
Sobremaduro	10,0 %
Podrido	2,5 %
Pedúnculo largo	0,0 %
Malformado	5,0 %

CALIFICACIÓN EN TRANSPORTADOR REDLER DESDE TOLVAS HACIA VAGONETAS (VISIÓN ARTIFICIAL)	
<b>RFF analizados y contados</b>	<b>1.285 (70% del total mezclado del viaje)</b>
Verde	11,2 %
Maduro	54,8 %
Sobremaduro	23,0 %
Podrido	2,0 %
Pedúnculo largo	0,0 %
Malformado	9,0 %

# Instalación de prototipo en redler (transportador) de RFF fresco en planta de beneficio

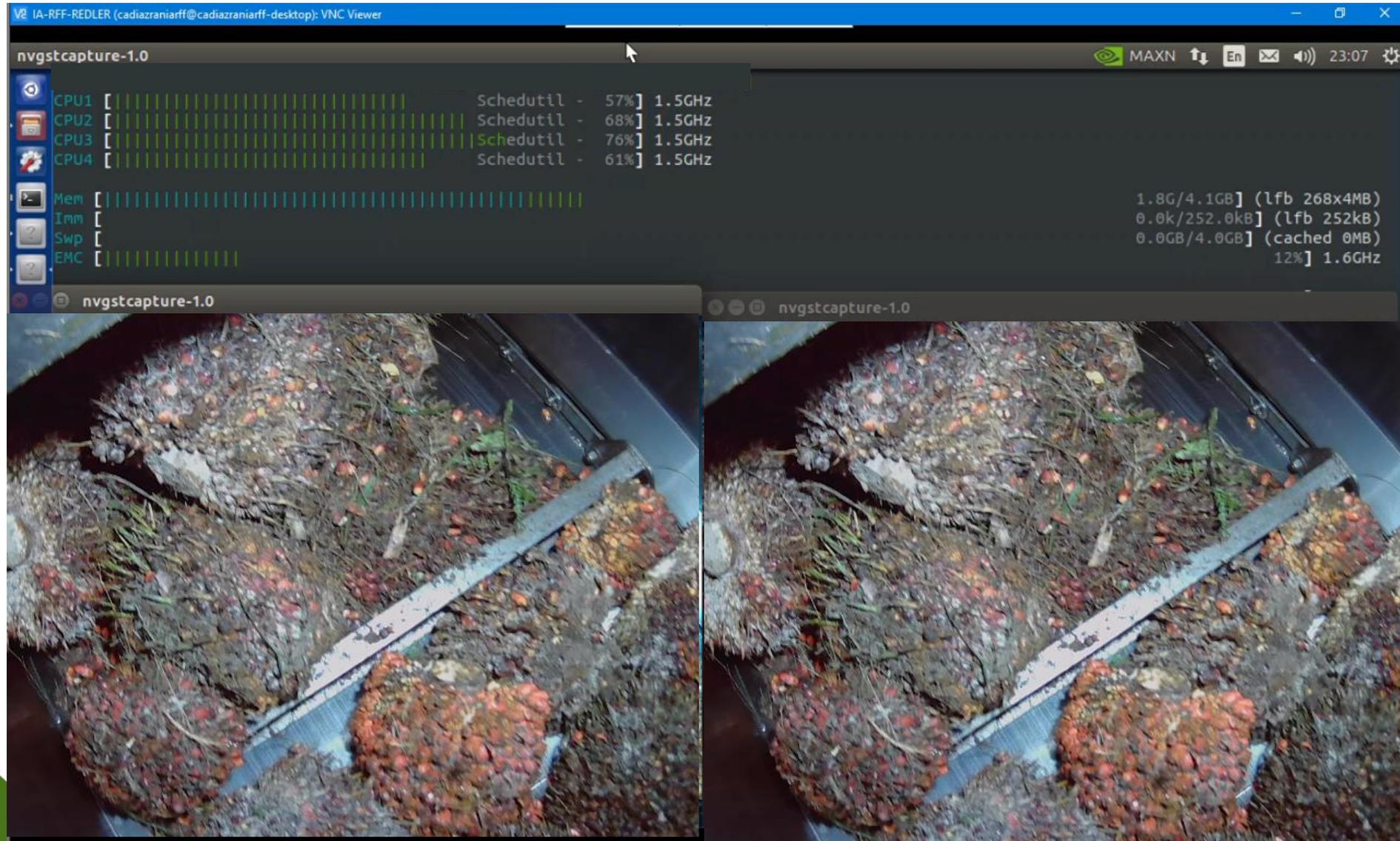


# Prototipo para identificación de racimos en redler (ambiente real en planta de beneficio)

Detección de racimos verdes  
(escala maduración)

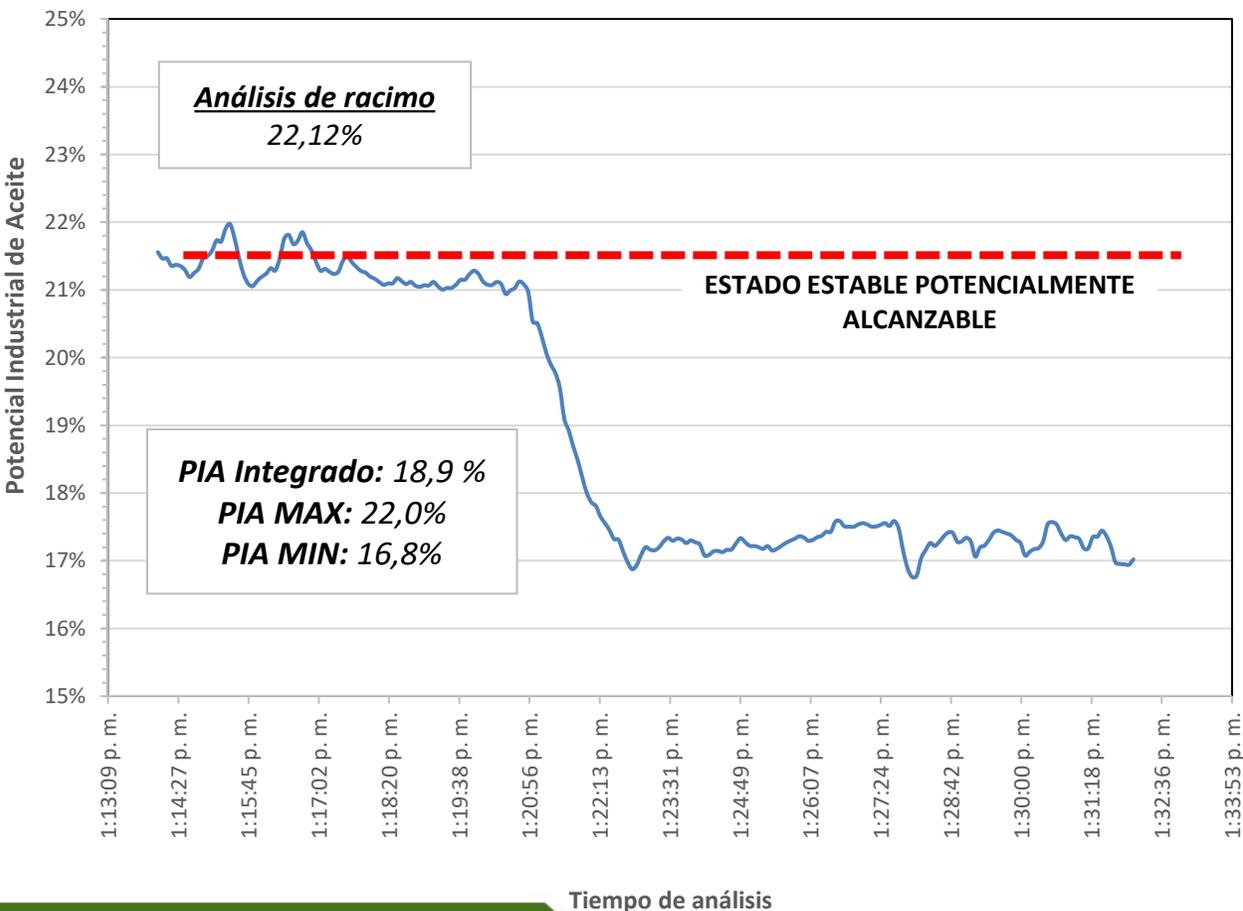
Ensayos con detección  
de RFF Verde > 70 %  
(total de muestra)

En desarrollo:  
detección de alvéolos vacíos



# Oportunidades detectadas en calificación de racimos: racimos verdes bajo análisis

PROVEEDOR S – DIA 39



## CALIFICACIÓN EN TOLVA POR MÉTODO CONVENCIONAL (NUDOS)

Verde	2,5%
Maduro	92,5 %
Sobremaduro	5,0%
Podrido	0,0%
Pedúnculo largo	0,0%
Malformado	0,0%

**PORCENTAJE DE RACIMOS VERDES SACADOS A LA SALIDA DEL DESFRUTADOR:** 13,5%

**Diferencia entre método convencional de calificación en tolva y lo observado en desfrutador** 11 puntos porcentuales

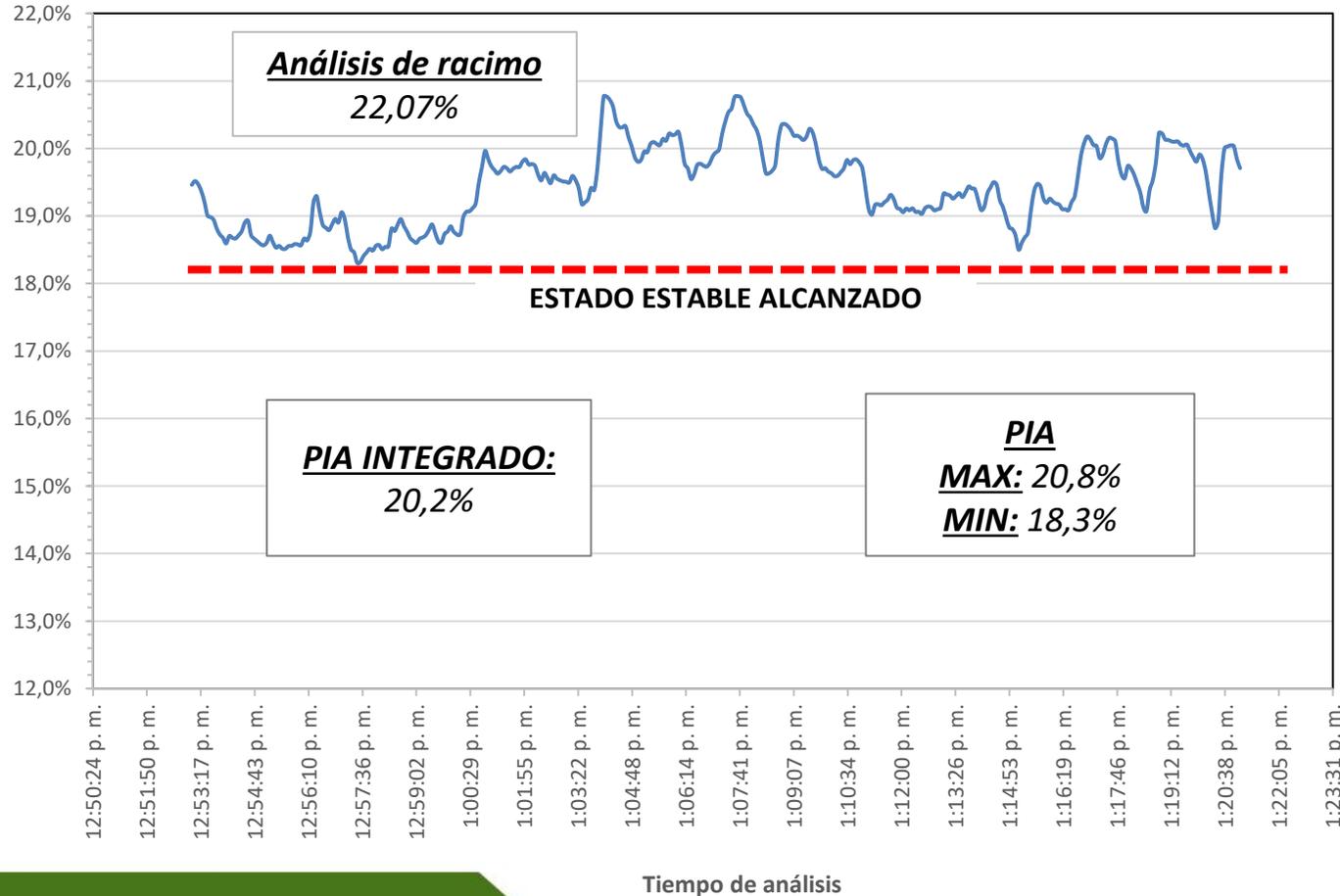
**Oportunidad de mejora si se identificara el 100 % de RFF Verde (puntos de extracción para este proveedor)** 1,49%

**Oportunidad económica por diferencia en cantidad de aceite** \$ 1.844.353

**Ejercicio de bonificación por proveedor que aplica esta planta (cuando RFF verde < 10%)** \$400.000 - \$800.000

# Oportunidades detectadas en calificación de racimos: racimos verdes bajo análisis

PROVEEDOR S – DIA 117



## CALIFICACIÓN EN TOLVA POR MÉTODO CONVENCIONAL (NUDOS)

Verde	0,0%
Maduro	90,0 %
Sobremaduro	5,0%
Podrido	2,5%
Pedúnculo largo	0,0%
Malformado	2,5%
<b>PORCENTAJE DE RACIMOS VERDES SACADOS A LA SALIDA DEL DESFRUTADOR:</b>	
	<b>8,6%</b>
Diferencia entre método convencional de calificación en tolva y lo observado en desfrutador	8,6 puntos porcentuales
Peso del viaje analizado	25.420
Oportunidad económica por diferencia en cantidad de aceite	<b>\$1.601.078</b>
Ejercicio de bonificación por proveedor que aplica esta planta (cuando RFF verde < 10%)	<b>\$400.000 - \$800.000</b>

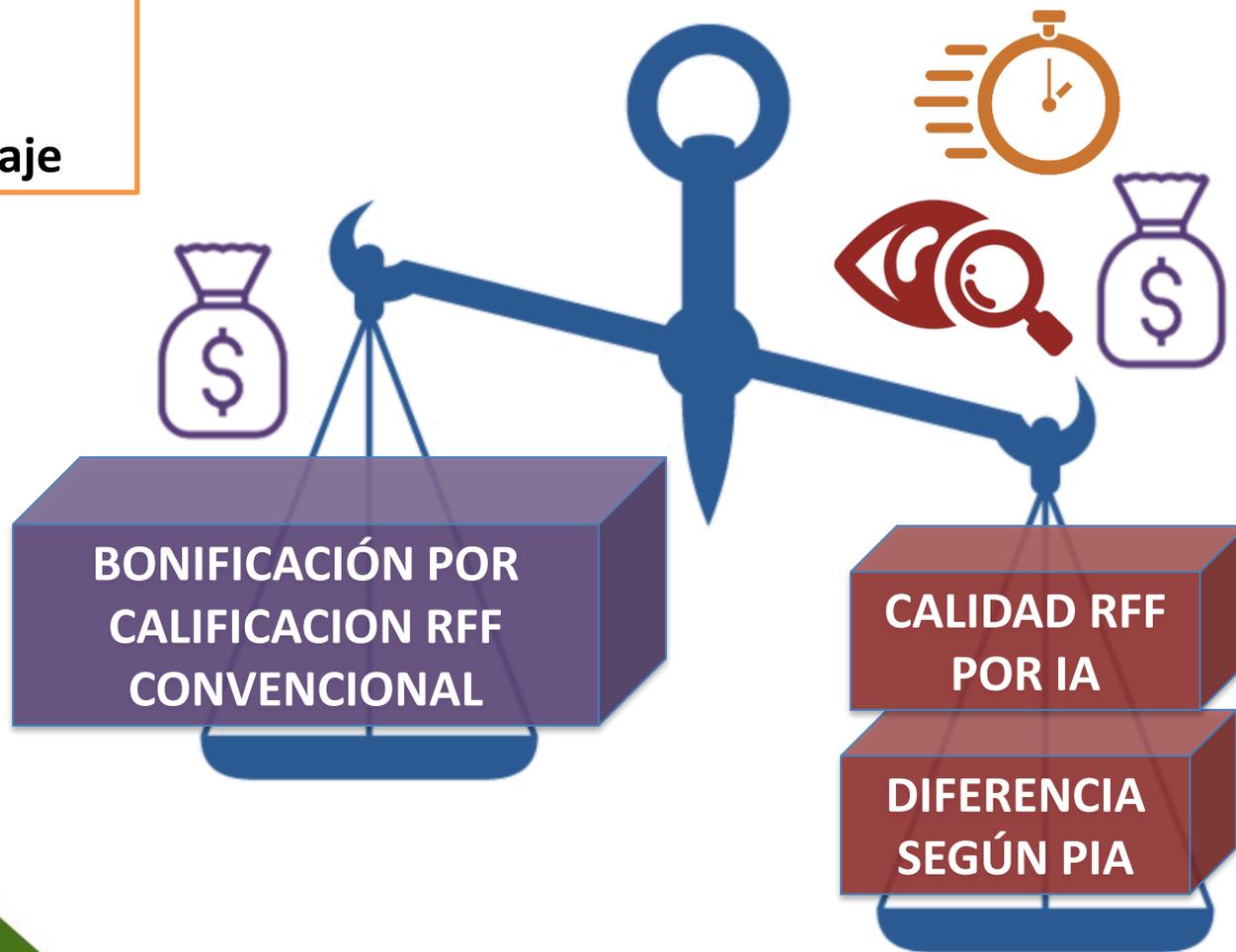
# Oportunidades económicas para productores y plantas de beneficio

## Proveedor S

- 12.000 t RFF total año
- 923 viajes enviados a planta
- 13 t RFF promedio / viaje

La calificación tradicional de calidad de RFF y sus escalas de bonificación particulares por planta solo permiten alcanzar

**< 280 MILLONES PESOS AÑO POR PROVEEDOR**



Sí se usa la calificación de RFF mediante IA junto con la medición de PIA en línea los beneficios partirían desde

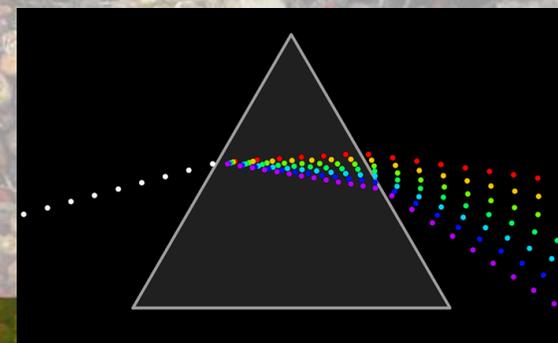
**> 1.500 MILLONES PESOS AÑO POR PROVEEDOR**

Ajuste de criterios de cosecha

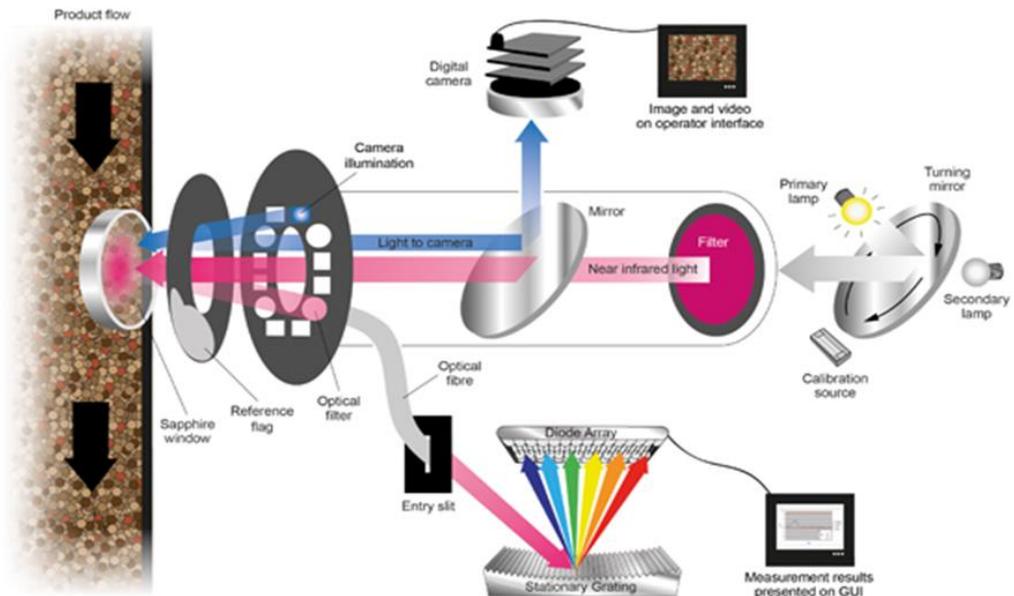
Identificar efectos del "campo sobre PB"

Mejoramiento de TEA por selección según PIA

# ¿Inteligencia artificial + espectroscopía?

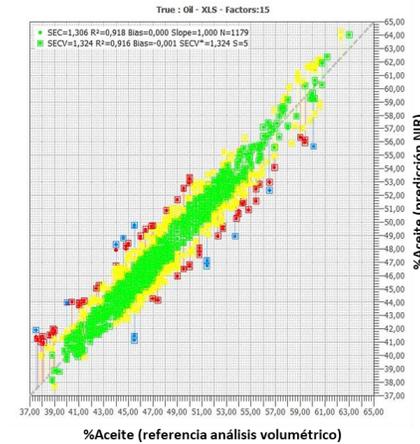


# Utilización de espectroscopía infrarroja (NIR + VIS)

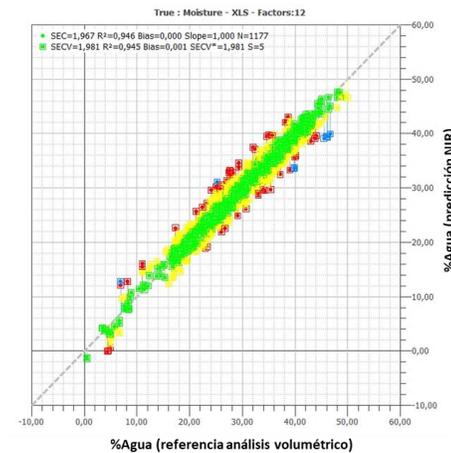


- Transmitancia
- Reflectancia
- Reflexión difusa

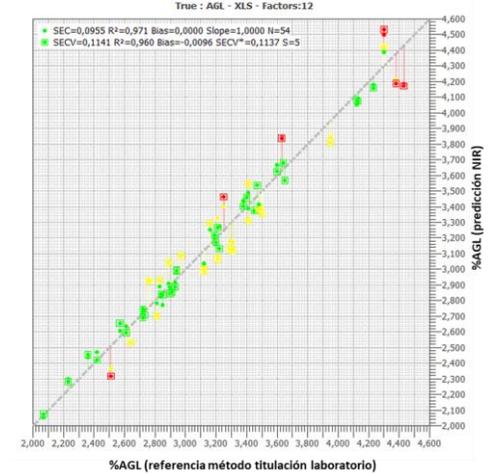
Modelo de predicción aceite en licor de prensa



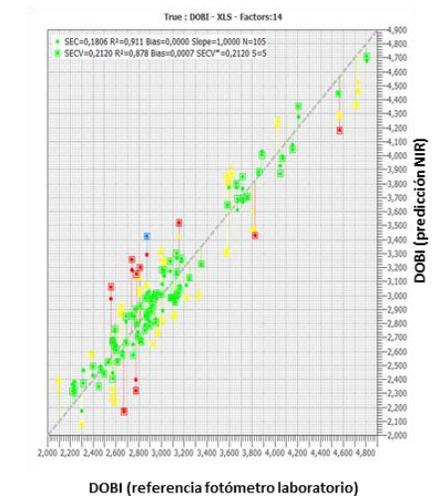
Modelo de predicción agua en licor de prensa



Modelo de predicción Ácidos Grasos Libres (AGL) en licor de prensa



Modelo de predicción DOBI en licor de prensa



# Comparación de equipos portátiles de espectroscopía infrarroja (NIR – VIS)



SciO- \$1k - NIR



Texas Instruments  
NIRScan Nano - \$1k



Agilent Exoscan – MIR \$60k



Spectral Evolution - NIR \$80k

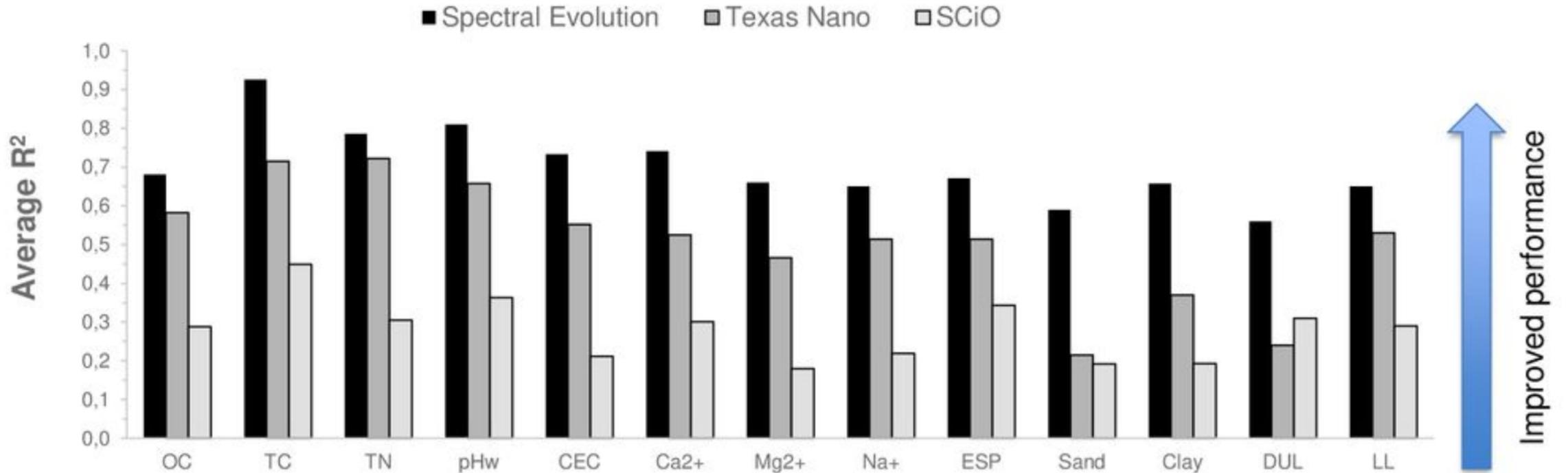


Agilent Flexscan – MIR \$60k



Fuente: Real time soil tests in the field? Science fiction or just over the horizon. Grains research and development corporation. Australian government.

# Comparación de equipos NIR para detección de sustancias orgánicas



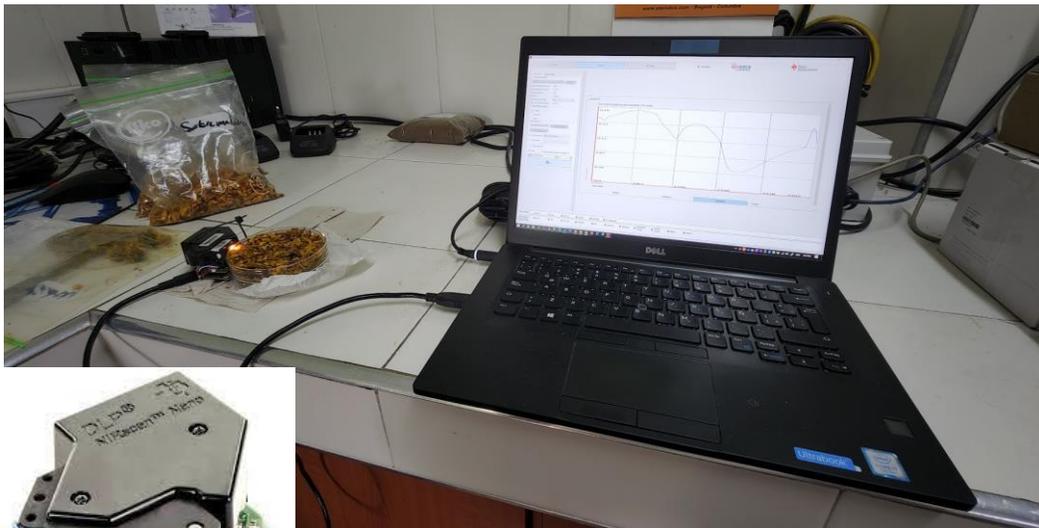
- ✓ Boro extraíble (B).
- ✓ Bases intercambiables, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>.
- ✓ Capacidad de intercambio catiónico (CEC).
- ✓ Contenido de humedad de secado al aire (ADM).
- ✓ Conductividad eléctrica (CE)

- ✓ pH.
- ✓ Cloruro.
- ✓ Carbono orgánico (C).
- ✓ Distribución del tamaño de las partículas (arena, limo, arcilla).
- ✓ Densidad aparente (BD).
- ✓ Límite superior drenado (DUL) (0,1 BAR) de humedad.

Fuente: Real time soil tests in the field? Science fiction or just over the horizon. Grains research and development corporation. Australian government.

# Avance de caracterización de fruto en diferentes presentaciones

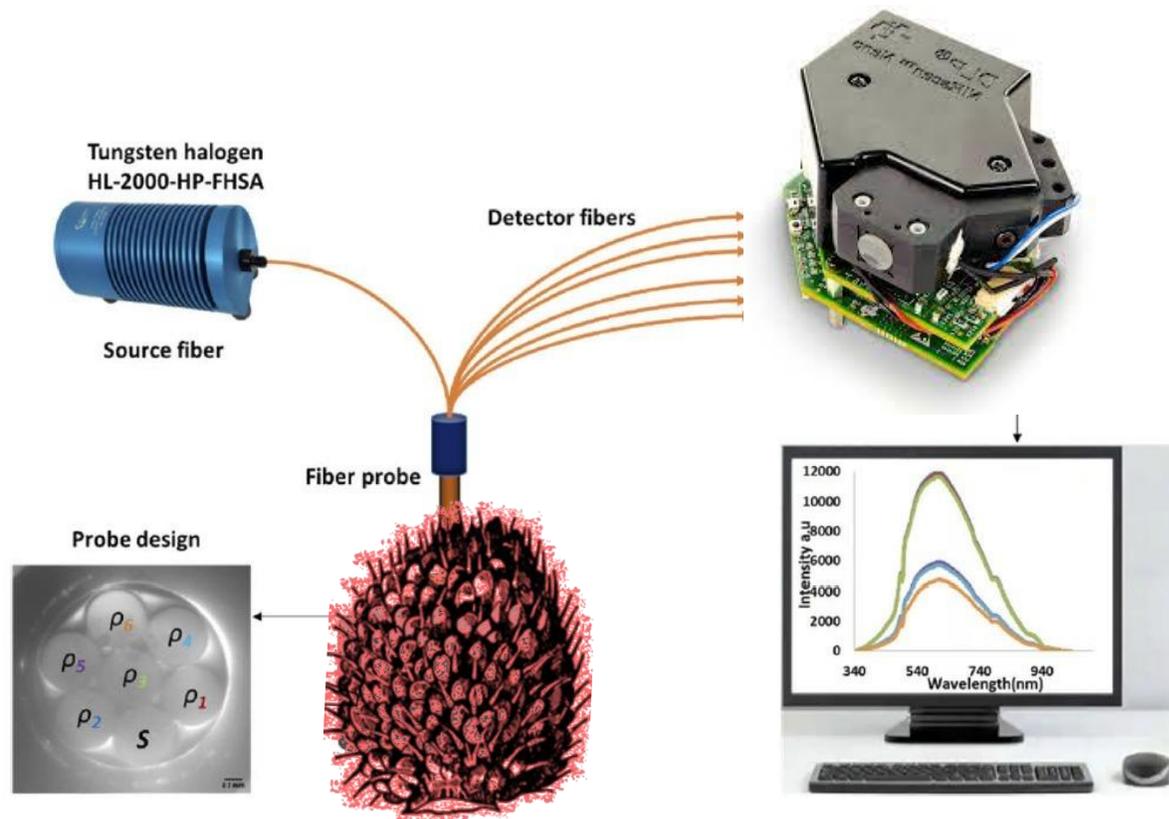
## Desarrollo de sensor de medición con fibra óptica

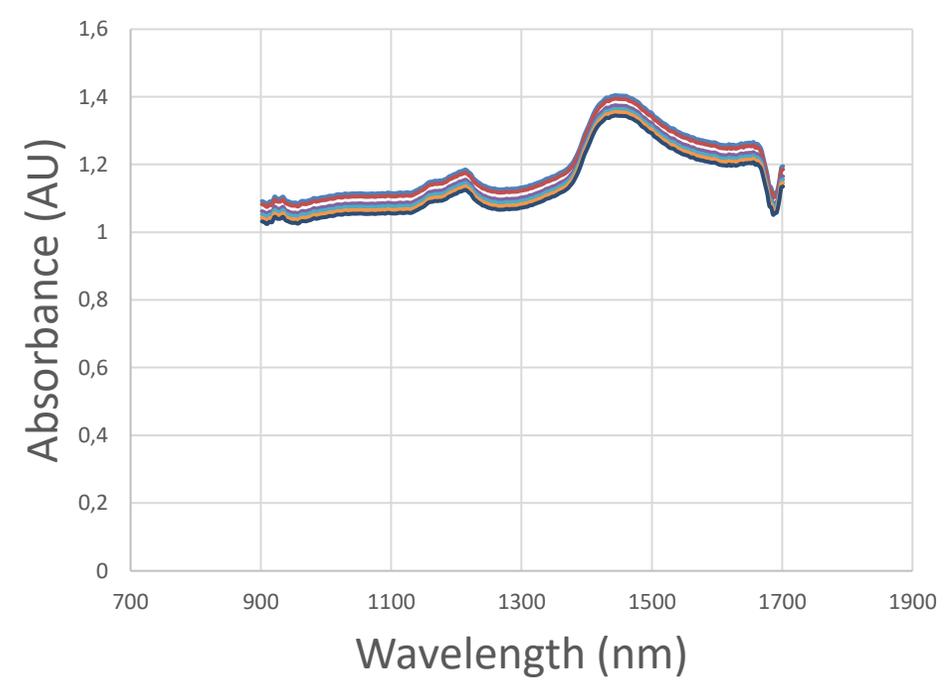
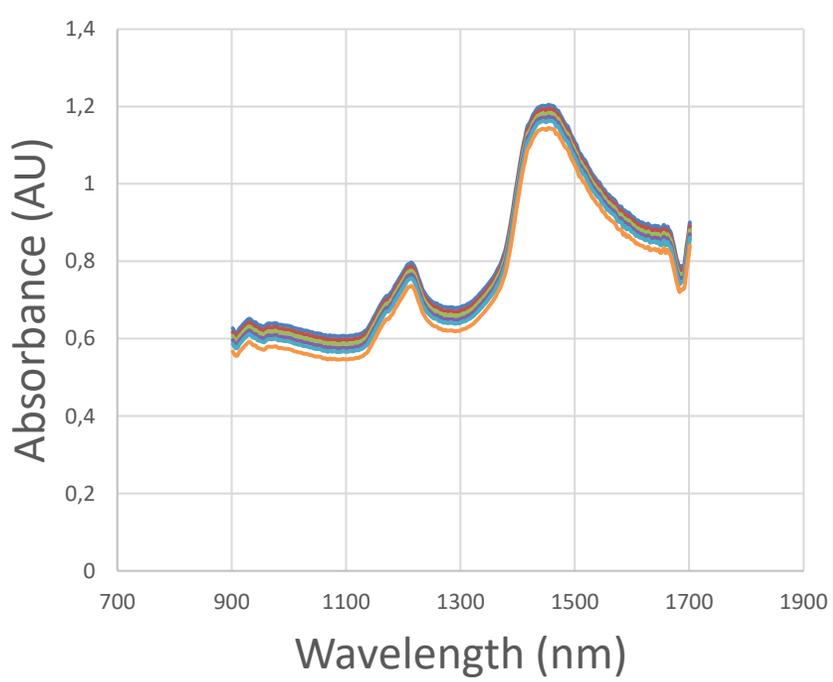
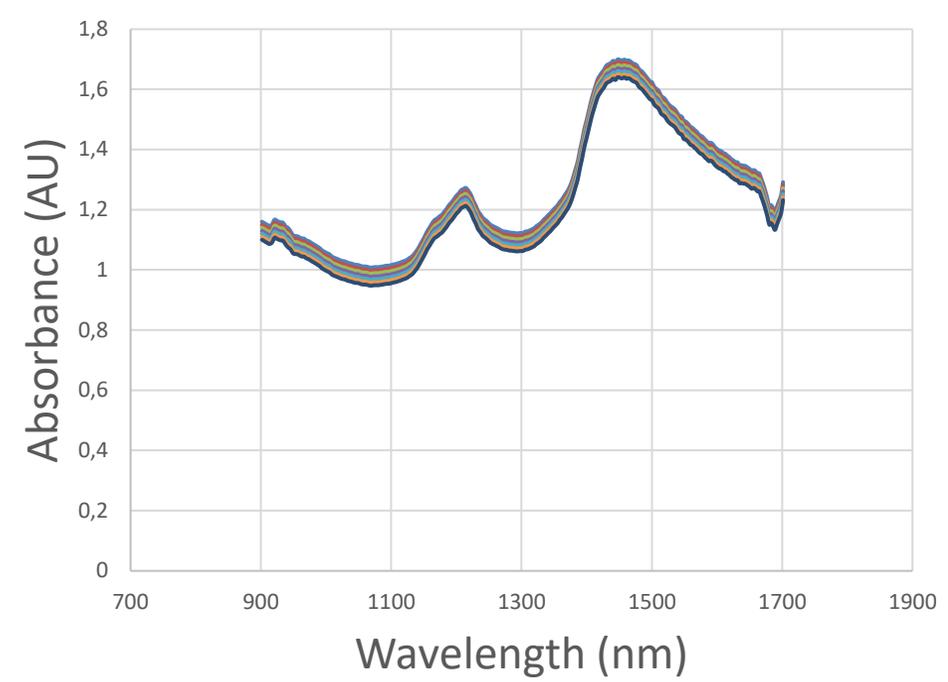
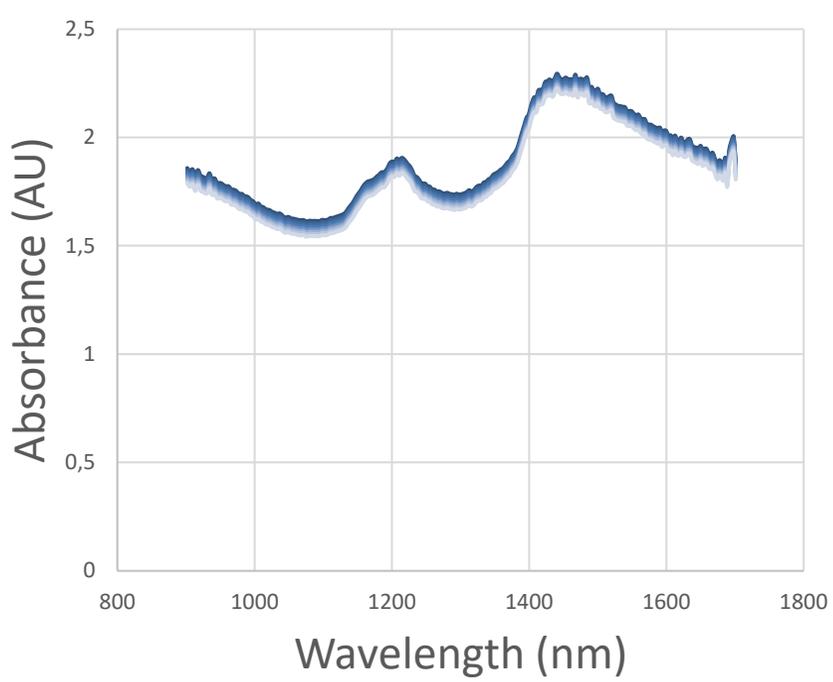


**Espectrómetro escala Nano  
(con ajustes de lentes)**

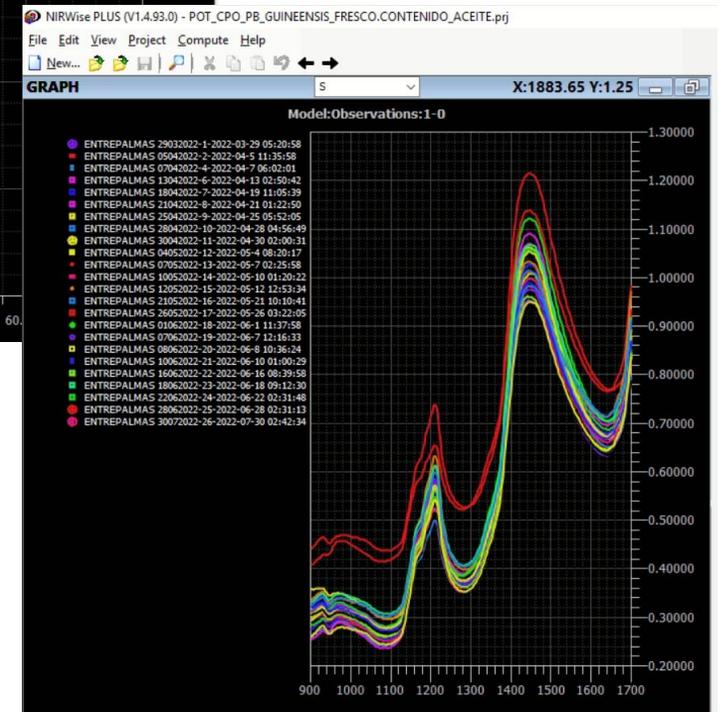
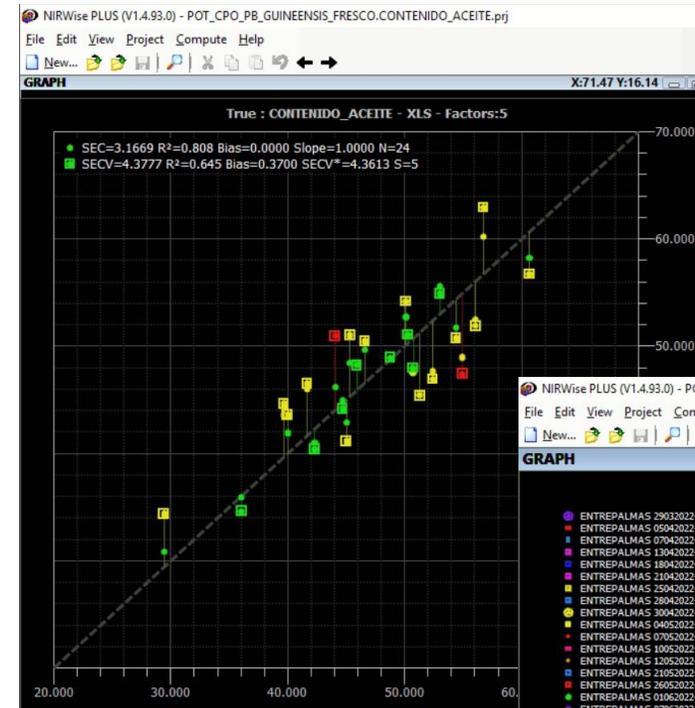
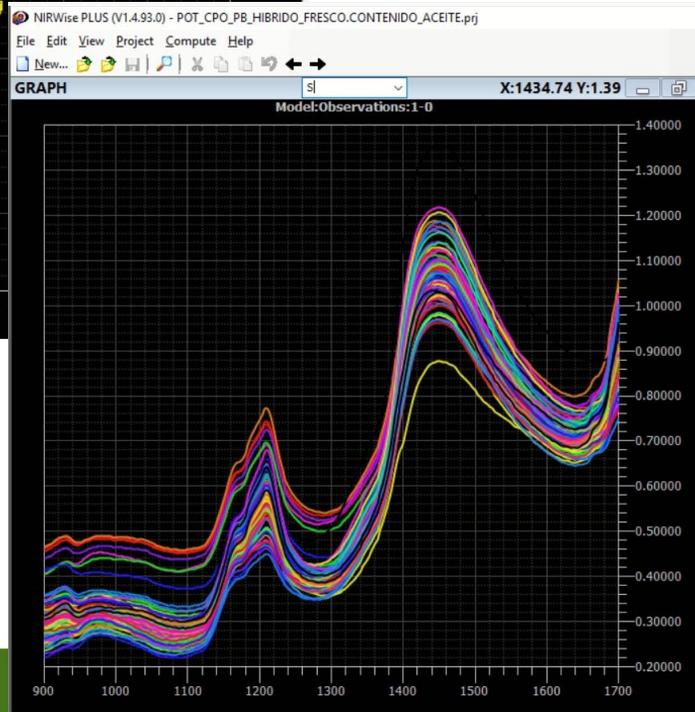
### Fruto *E. guineensis*:

- Fruto entero (análisis de caras X 6)
- Fruto picado (posteriormente soxhlet para contenido de aceite)
- Fruto en grado madurez: verde, maduro, sobremaduro, podrido.

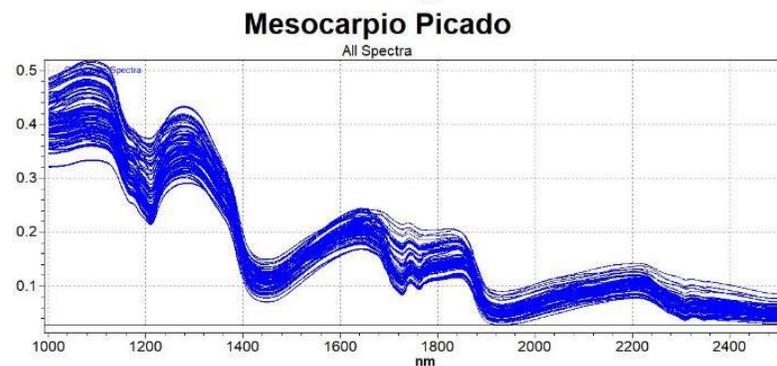
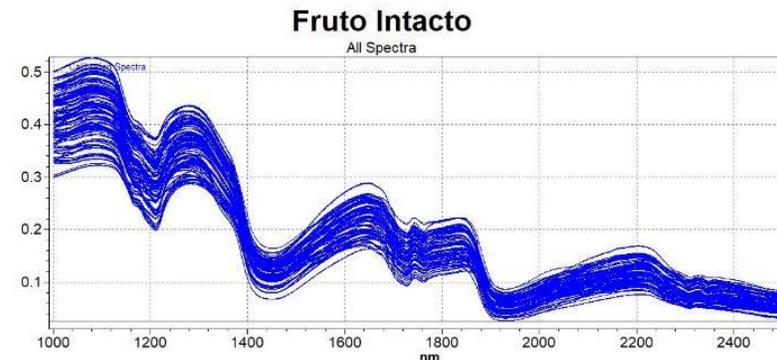
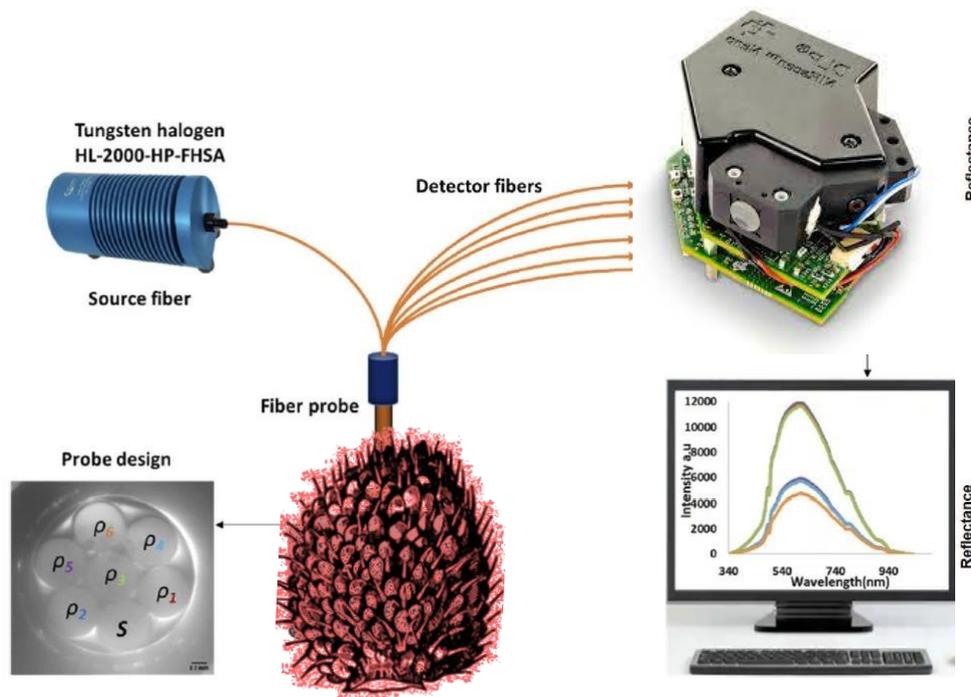
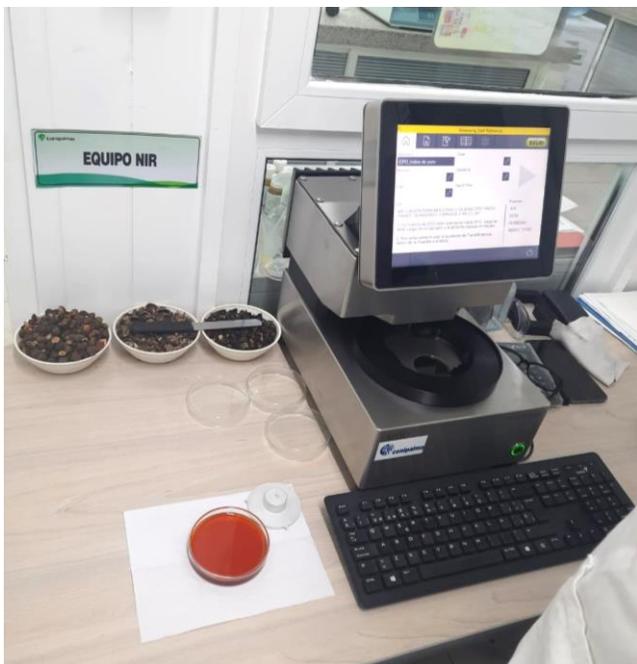




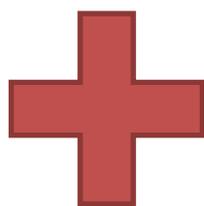
# Modelos de predicción de aceite y humedad para mesocarpio picado fresco (E. guineensis e Híbridos OxG en NIR Proximate)



# Ajuste y corrección de modelos de predicción en equipos nano a partir de equipos NIR de laboratorio



Equipos NIR de laboratorio  
(ajuste referencial)



Equipo NIR nano  
(con información  
capturada en sitio)

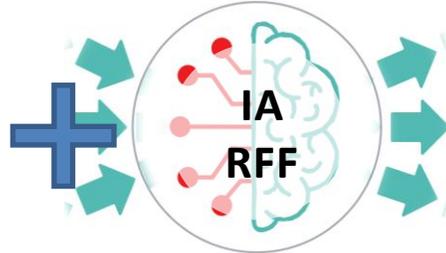


Modelos de predicción  
refinados  
(aceite y agua)

# Tecnologías para el cierre de brechas de productividad desde campo hasta planta de beneficio



**TEMIS en línea**  
Cantidad y calidad de aceite



**IA RFF**  
Inteligencia Artificial y NIR para calificación de racimos



**NIR**  
Tecnología de Infrarrojo cercano  
(Aplicación para monitoreo de pérdidas aceite)

Parámetro	% Ac / RFF	TEA
Potencial Ideal	27%	27%
Pérdida de aceite en campo	0.5%	26.5%
Pérdidas por plagas y enfermedades	2.0%	24.5%
Pérdida por Impurezas	0.5%	24.0%
Pérdida por pedúnculo largo	0.3%	23.7%
Pérdidas en calidad de fruto (madurez)	1.2%	22.5%
Pérdidas en planta de beneficio	1.7%	<b>20.8%</b>

**Tasa de Extracción de Aceite final obtenido en planta**

*García-Núñez, 2017*

**6.2 puntos perdidos de aceite**  
pero ahora se podrán monitorear para establecer planes de mejora

Ecosistema de tecnologías para el mejoramiento continuo

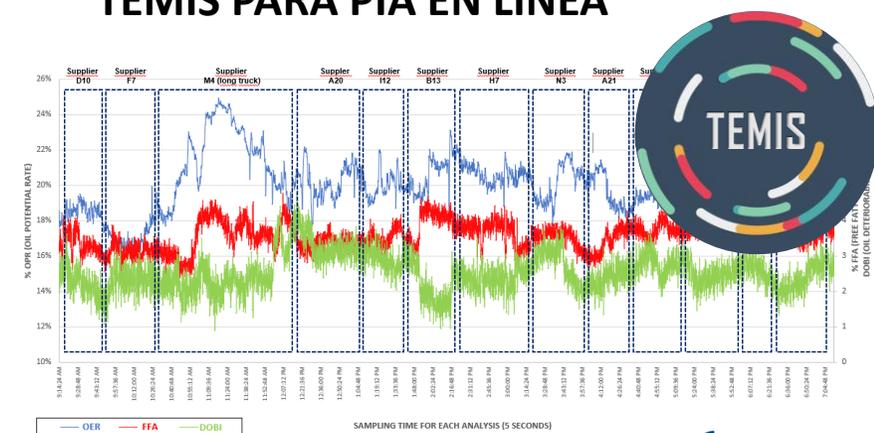
IA RFF PARA PLANTACIÓN



IA RFF PARA TOLVAS



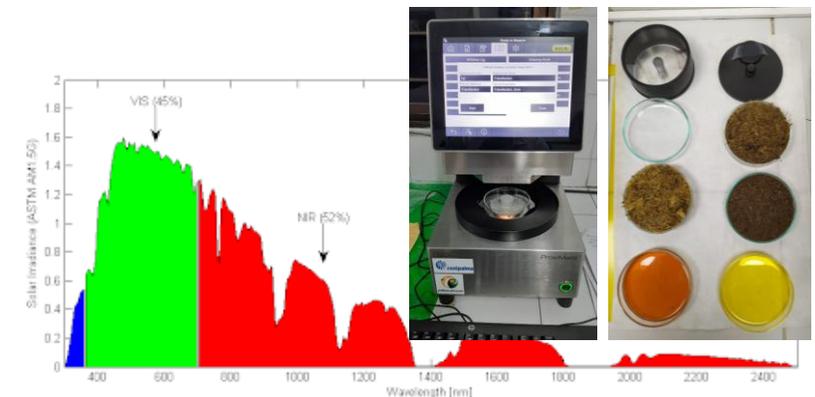
TEMIS PARA PIA EN LÍNEA



IA RFF EN TRANSPORTE EN PB



NIR PARA PÉRDIDAS DE ACEITE



# Conclusiones

- ✓ Los antecedentes y recursos disponibles en el mercado representadas en tecnologías de hardware portátil y algoritmos para procesamiento de datos mediante métodos de Deep Learning, son aplicables ampliamente al contexto de los problemas que se tienen en el gremio palmero, como es el caso de la calificación de fruto en tolva y la identificación de patrones mediante imágenes en planta de beneficio.
- ✓ El prototipo en desarrollo para optimizar procesos como la calificación de racimos y la identificación de patrones mediante visión artificial en planta de beneficio, si bien, ofrece una alternativa robusta para mejorar estos procesos, sin embargo, aun continúa el camino de investigación para abarcar más criterios y características de racimos, debido a que parte de la variabilidad identificada, aun no puede ser detectada por este tipo de tecnologías.
- ✓ Lograr desarrollar modelos de predicción mediante espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) para cada estado de madurez de racimos permitirá refinar la respuesta final por parte del sistema inteligente. La calificación acerca del grado de madurez se basará en condiciones morfológicas, colorimétricas y de contenido de aceite/agua en el exterior del racimo.

## Agradecimientos

- ✓ A la planta de beneficio Agroince, a sus directivas y a sus ingenieros Helí Meneses, Eliberto Moreno, Mauricio García, Silvia Mesa, Daniela Quiñonez y al personal operativo y de laboratorio.
- ✓ Leonardo Ramírez y Nathalia Forero de la empresa suiza Büchi Labortechnik por su orientación sobre el uso de tecnologías espectrales.
- ✓ Jenny Rodríguez, Alexis González, Iván Ayala e Ingrid Cortés por su apoyo en métodos de referencia en laboratorios de Cenipalma e información sobre cultivares.



**XX**  
Conferencia  
Internacional sobre  
20th International Oil Palm Conference

**PALMA  
DE ACEITE**

**EL PODER TRANSFORMADOR  
DE LA PALMA DE ACEITE**

# Gracias

---