

Visión por computador en tractores robotizados para agricultura de precisión

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y DE CONTROL

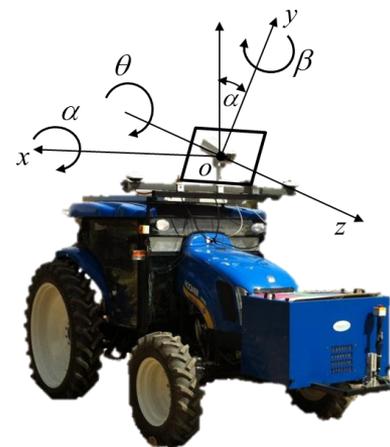


UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

Facultad de Informática

Departamento de Ingeniería del Software e Inteligencia Artificial

Gonzalo Pajares Martinsanz



Contexto



Robot Fleets for Highly Effective Agriculture and Forestry Management

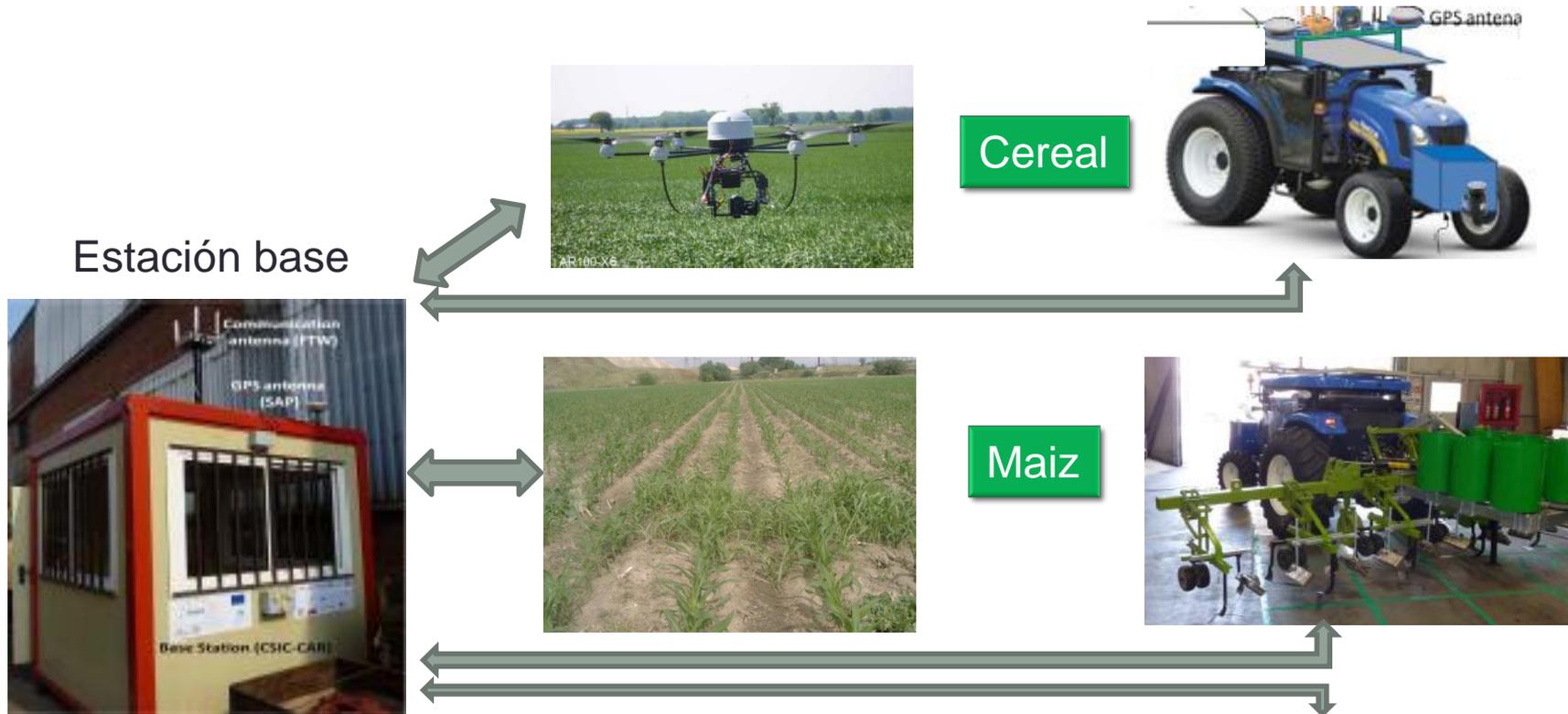
FLOTA DE ROBOTS



SISTEMA DE VISIÓN EN MAÍZ



SISTEMAS Y TAREAS



Cereal



Maiz



Olivos

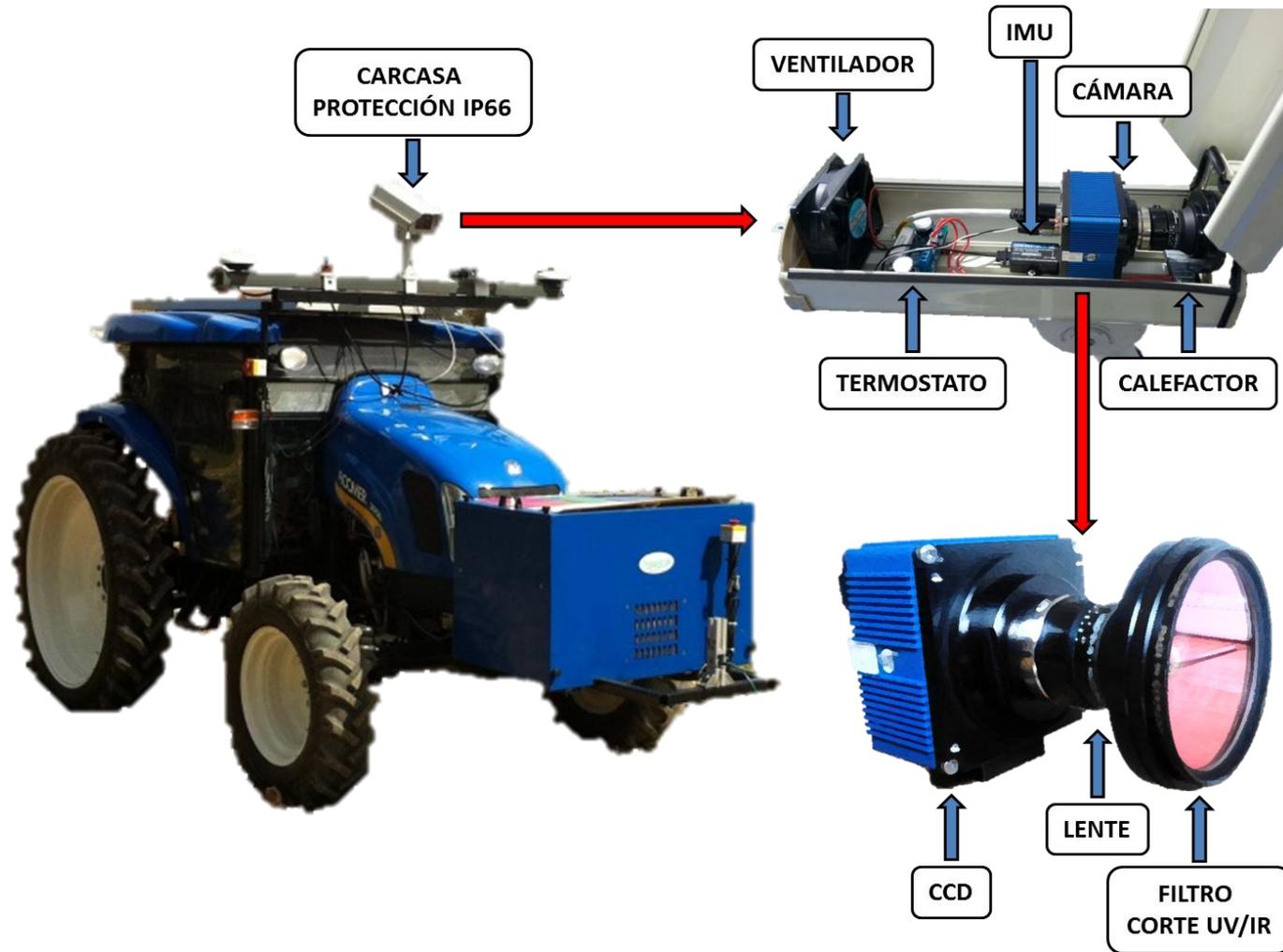


Sistema de Visión

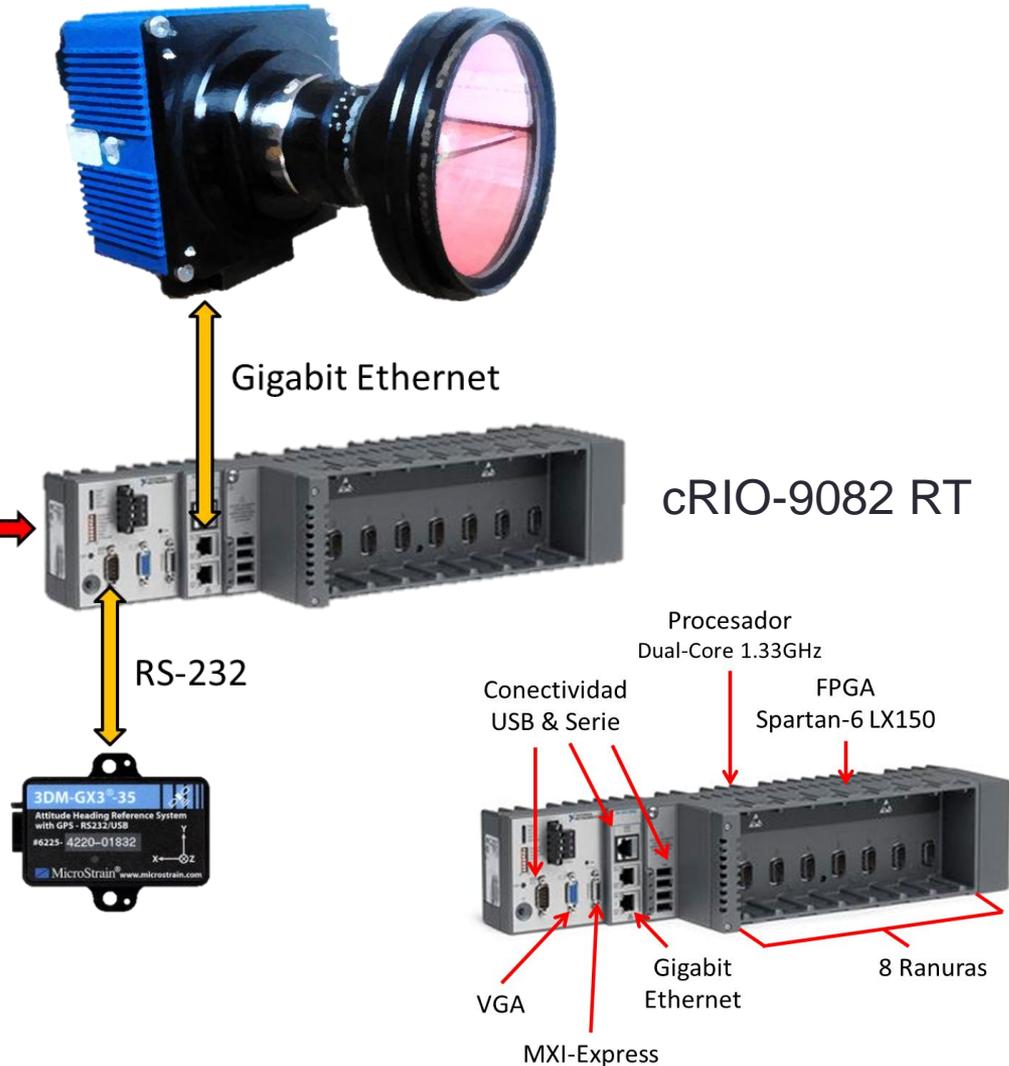
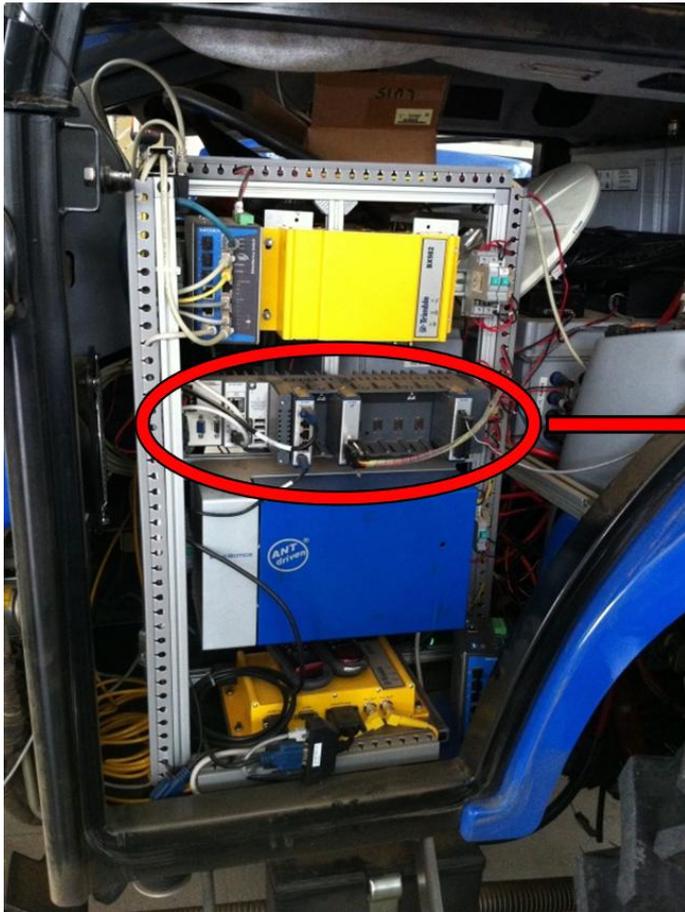
Problemas en entornos agrícolas de exterior

<ul style="list-style-type: none"> • Distorsiones radiométricas • Influencia del espectro infrarrojo y ultravioleta • Condiciones de iluminación cambiantes 	<p>Obtención de imágenes de calidad</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Identificación de plantas (cultivo y malas hierbas) • Condiciones climatológicas adversas • Plantas enmascaradas (barro o en proceso de secado) 	<p>Segmentación y umbralización</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Terreno agrícola con desniveles • Desviaciones del tractor respecto de su trayectoria • Tratamiento específico por zonas: solapamiento 	<p>Identificación de líneas de cultivo</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Localización espacial de malas hierbas 	<p>Identificación de malas hierbas</p>

Prototipo RHEA – Hardware

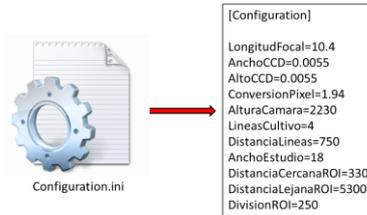


Prototipo RHEA – Hardware



Prototipo RHEA – Software

- Interfaz de configuración



- Interfaz de usuario

Rutas del sistema

Ruta configuración del sistema de visión:

Ruta DLL procesamiento:

Segmentación de la imagen

Binarización:

Apertura:

Tratamiento de la imagen

Vignetting:

Balance de blancos:

Detección de líneas de cultivo

Detección de líneas:

Grados orientación:

Ángulos:

Pitch:

Roll:

Yaw:

Delimitación de la ROI en píxeles

Superior:

Inferior:

Izquierda:

Derecha:

Imagen procesada

Guiado

Desplazamiento superior (mm):

Desplazamiento inferior (mm):

Tiempo de procesamiento

Duración media (ms):

Procesado actual (ms):

Iniciar tratamiento:

Finalizar tratamiento:

Tratamiento selectivo



Vídeo 1

Vídeo 2

Vídeo 3

Guiado



Vídeo: primeros pasos

Vídeo: perfección

Sistema de Visión

- Obtención de imágenes de calidad
- Segmentación y umbralización
- Identificación precisa de líneas de cultivo
- Detección de malas hierbas
- Guiado del vehículo autónomo
- Controlar el solapamiento



Proceso de identificación de líneas de cultivo y malas hierbas

Obtención de la imagen



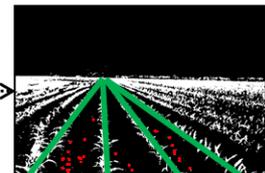
Extracción de verdes

Umbralización



Identificación de líneas de cultivo

Identificación de malas hierbas



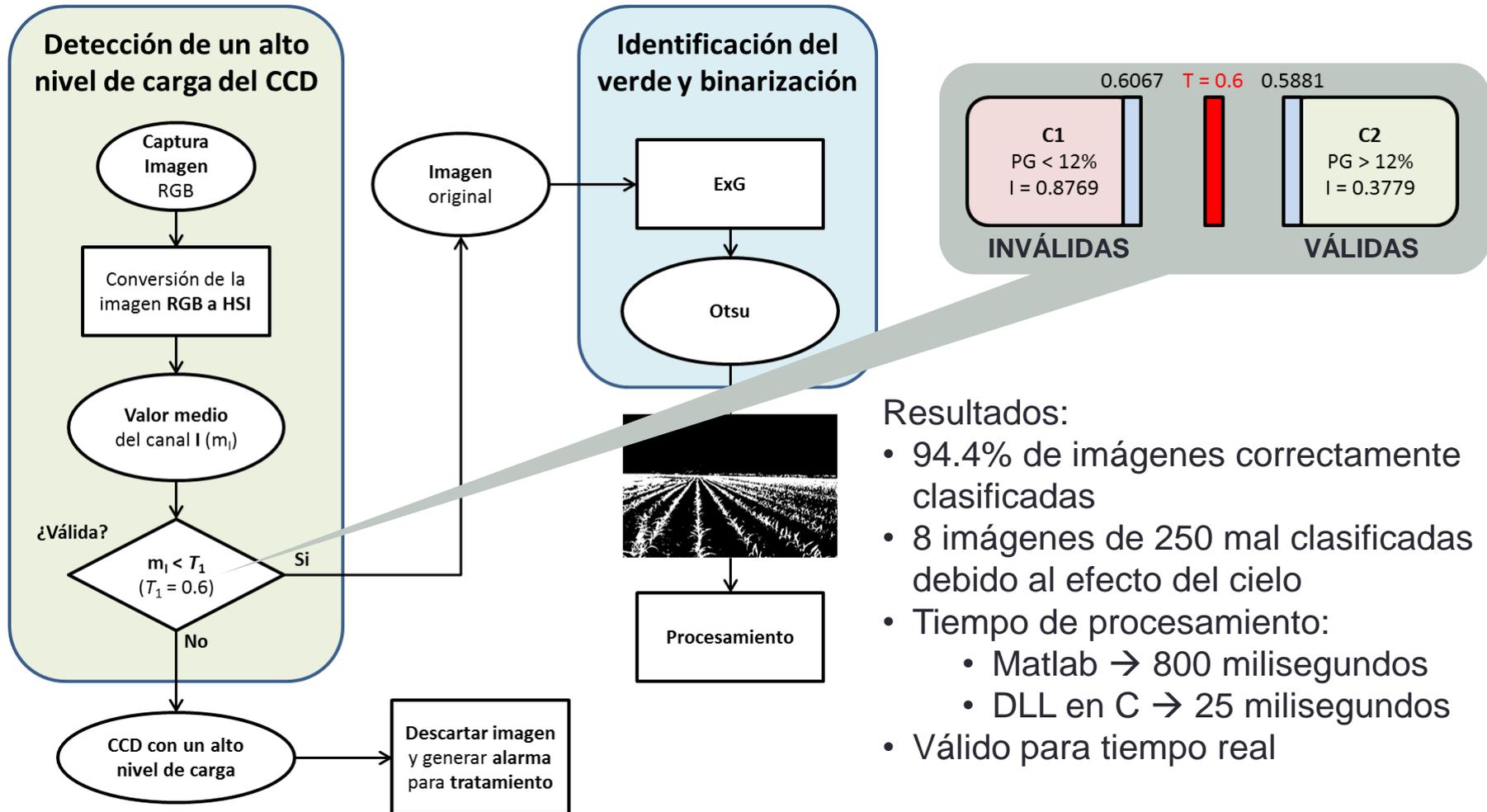
Tiempo real: 890 ms (8 km/h) – 2381 ms (3 km/h)

Obtención de imágenes de calidad

- Identificación de imágenes con alta intensidad luminosa
- Control del tiempo de exposición
 - Basado en el color blanco
 - Basado en la intensidad lumínica
- Efecto *vignetting*
- Balance de blancos



Identificación de imágenes con alta intensidad luminosa



Control del tiempo de exposición

- Ajuste automático y variable en función de la climatología
 - Sistema óptico con apertura del iris ajustable automáticamente:
 - **Ventaja:** evita el procesamiento software
 - **Inconvenientes:** precio, vibraciones del vehículo
 - Sistema óptico con ajuste manual del iris:
 - **Ventajas:** precio, independiente de las vibraciones del vehículo
 - **Inconvenientes:** cámara con ajuste del tiempo de exposición, procesamiento software

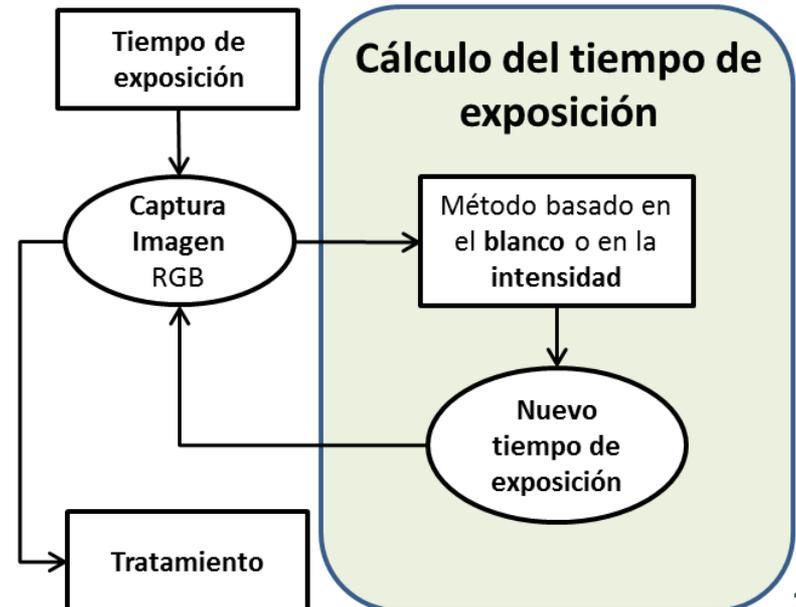


Sistema óptico automático

o

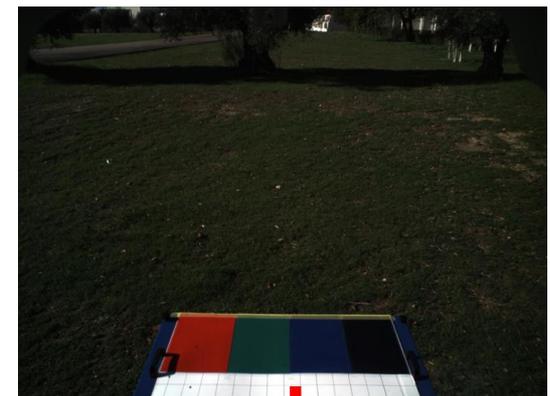
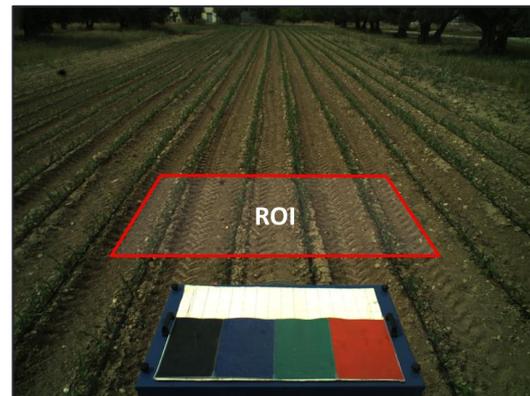
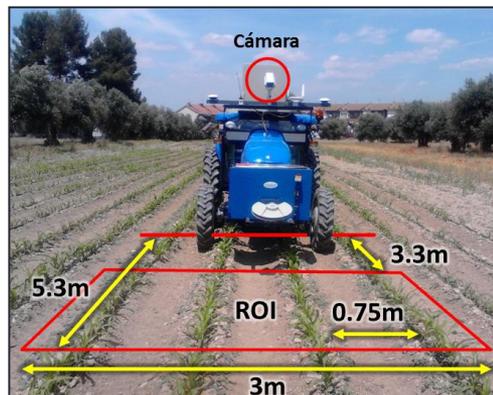


Sistema óptico manual y cámara que permite el ajuste del tiempo de exposición



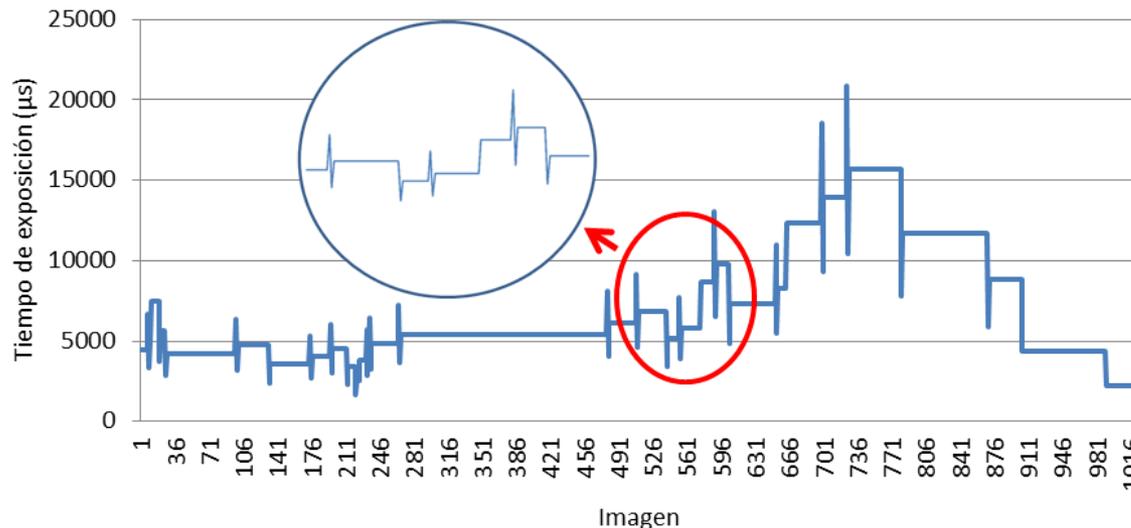
Control del tiempo de exposición

- Basado en el color blanco
 - Píxel blanco puro: $R = 255, G = 255, B = 255$ (saturación)
 - Obtener diferencias del valor de cada canal respecto al valor 200 (evitar la saturación)
 - Si dos de las componentes difieren en el mismo sentido, se incrementa o disminuye el tiempo de exposición.
 - **Ventajas:** tiempo de procesamiento reducido
 - **Inconvenientes:** necesita una referencia blanca, susceptible a errores al no estudiar la zona de interés (ROI)



Control del tiempo de exposición

- Basado en la intensidad lumínica
 - Conversión del espacio de color RGB a HSI $\rightarrow m_l$ (canal I)
 - Estudio de imágenes con alta intensidad luminosa \rightarrow umbral 0.6
 - Evitar saturación (0.6) \rightarrow Umbral inferior 0.1 y superior 0.4
 - Si m_l está por debajo de 0.1 se incrementa y si es superior a 0.4 se decrementa el valor del tiempo de exposición un 10% del valor del tiempo anterior
 - Entre 2 y 3 imágenes para ajustar el tiempo tras un cambio

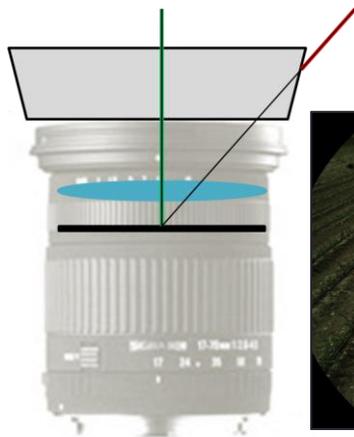


Efecto vignetting

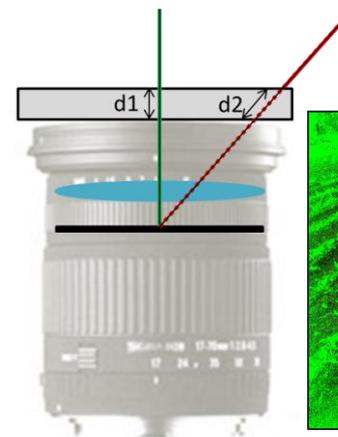
- Aparición de bordes negros o sombreados acentuados sobre todo en las esquinas:
 - **Mecánico**: bloqueo físico por parasoles, filtros u objetivos mal colocados
 - **Óptico**: apertura del iris al máximo, construcción del objetivo y disposición de las lentes o filtros creados por múltiples capas superpuestas donde los rayos recorren distancias distintas



Sin filtros o parasoles



Vignetting mecánico

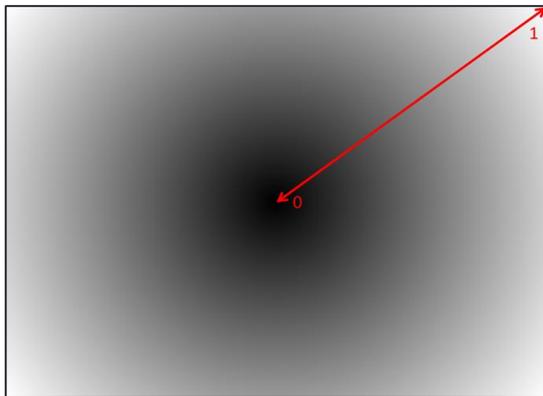


Vignetting óptico



Efecto vignetting

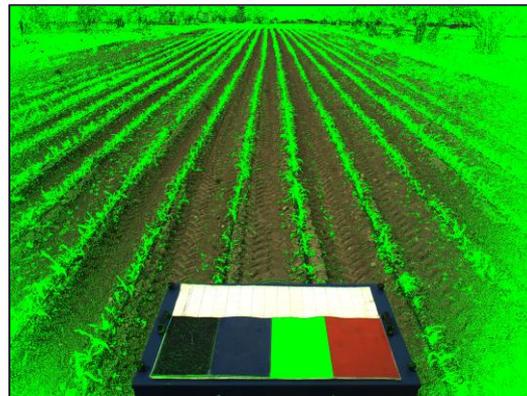
- Corrección del *vignetting*:
 - **Mecánico**: ajustar los parasoles, filtros u objetivos mal colocados
 - **Óptico**: corrección de intensidad en cada píxel sobre cada canal
 - Obtención de la distancia del píxel al centro de la imagen
 - Cada canal afectado es modificado por un factor distinto
 - El nuevo valor depende de la distancia y del factor de corrección



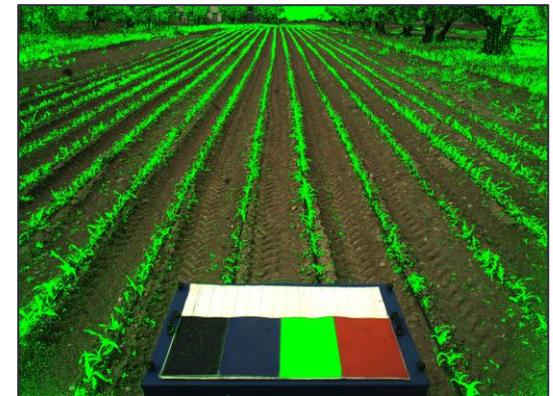
$$R(x, y) = 1 + FR \cdot dist(x, y)$$

$$G(x, y) = 1 + FG \cdot dist(x, y)$$

$$B(x, y) = 1 + FB \cdot dist(x, y)$$



Sin corrección del vignetting



*Corrección del vignetting
sobre el canal rojo*

Efecto vignetting

- Resultados:
 - Extracción de verdes (píxeles correctamente clasificados):
 - Imagen original: 80.3%
 - Imagen modificada: 87.3%
 - Tiempo de procesamiento:
 - Imagen original (extracción de verdes): 82.5 ms
 - Imagen modificada (corrección y extracción de verdes): 132.2 ms
- Válido para tiempo real

Balance de blancos

- Escalar la luminancia relativa de la imagen:
 - Los objetos aparecen con sus colores naturales y mantienen un equilibrio entre ellos
- Se necesita una zona de referencia blanca
- Cada canal se escala en función de su cercanía al color blanco puro cuyo valor es 255

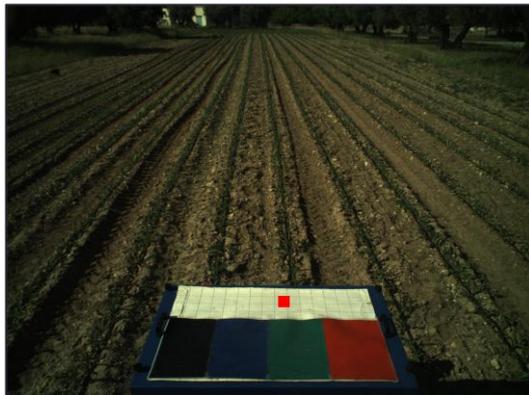


Imagen original



*Imagen modificada con
balance de blancos*

Balance de blancos

- Resultados:
 - Extracción de verdes (píxeles correctamente clasificados):
 - Imagen original: 80.3%
 - Imagen modificada: 81.6%
 - Tiempo de procesamiento:
 - Imagen original (extracción de verdes): 82.5 ms
 - Imagen modificada (balance y extracción de verdes): 95.7 ms
 - Ligera mejora:
 - Los tres canales son modificados proporcionalmente
 - Atractiva visualmente para el ojo humano
 - Válido para tiempo real

Segmentación y umbralización

- Dividir una imagen digital en zonas disjuntas e individualizadas:
 - Simplificar y/o cambiar la representación por otra más significativa
 - Asignar a cada píxel de la imagen una etiqueta que lo defina
- En imágenes agrícolas → realzar la capa vegetal
- Índices vegetativos
- Paso previo a la umbralización (binarización)



Imagen original



Imagen segmentada



Imagen binarizada

Segmentación y binarización basada en $YD_B D_R$

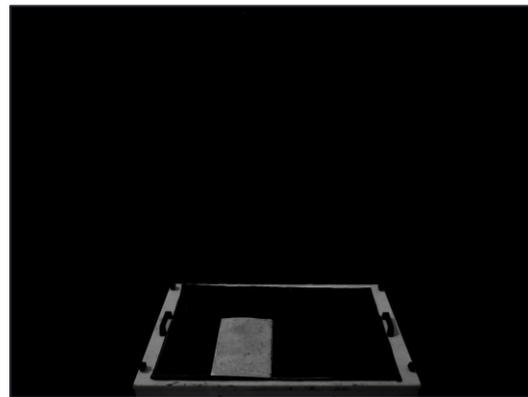
- Basado en el modelo YUV
- Consta de:
 - $Y \rightarrow$ Luminancia
 - $D_B \rightarrow$ Crominancia azul
 - $D_R \rightarrow$ Crominancia roja
- Verde representado en D_R



Imagen original



Luminancia



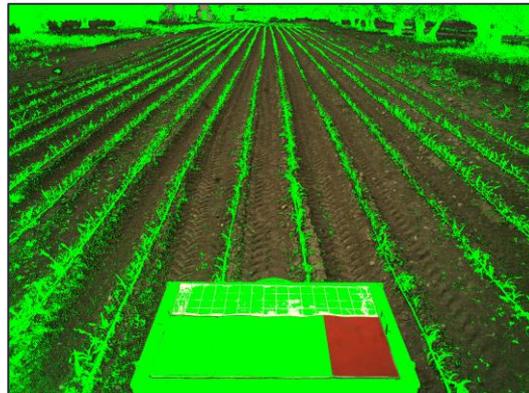
Crominancia azul



Crominancia roja

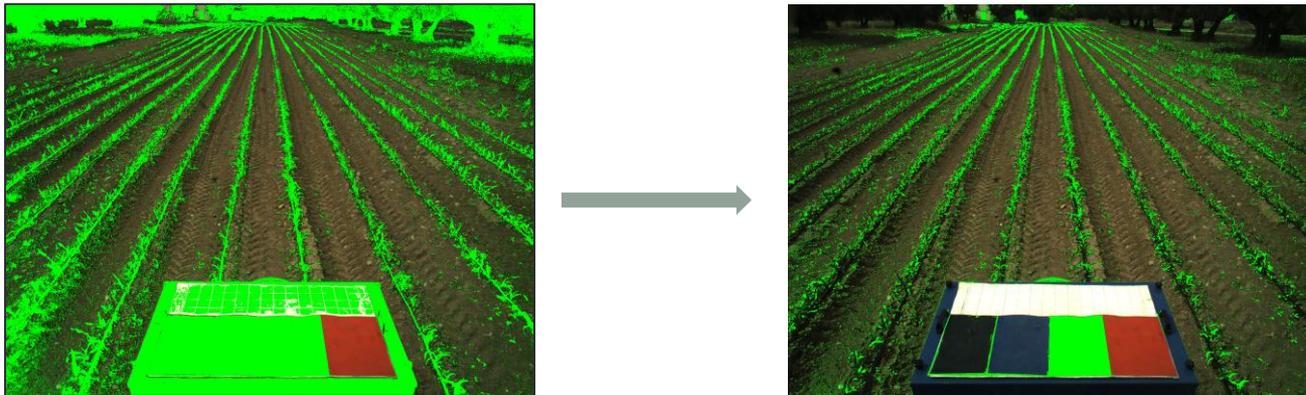
Segmentación y binarización basada en $YD_B D_R$

- Aprendizaje del umbral (2000 imágenes):
 - (Crominancia roja – Crominancia azul) $\rightarrow D'_R$
 - Se aplica el método de Otsu sobre D'_R
 - El valor promedio de Otsu se fija como umbral
- Fase de decisión:
 - Transformar de RGB a $YD_B D_R$
 - Si el valor D_R del píxel es mayor que el umbral \rightarrow Planta
 - Si el valor D_R del píxel es menor o igual que el umbral \rightarrow Suelo



Segmentación y binarización basada en $YD_B D_R$

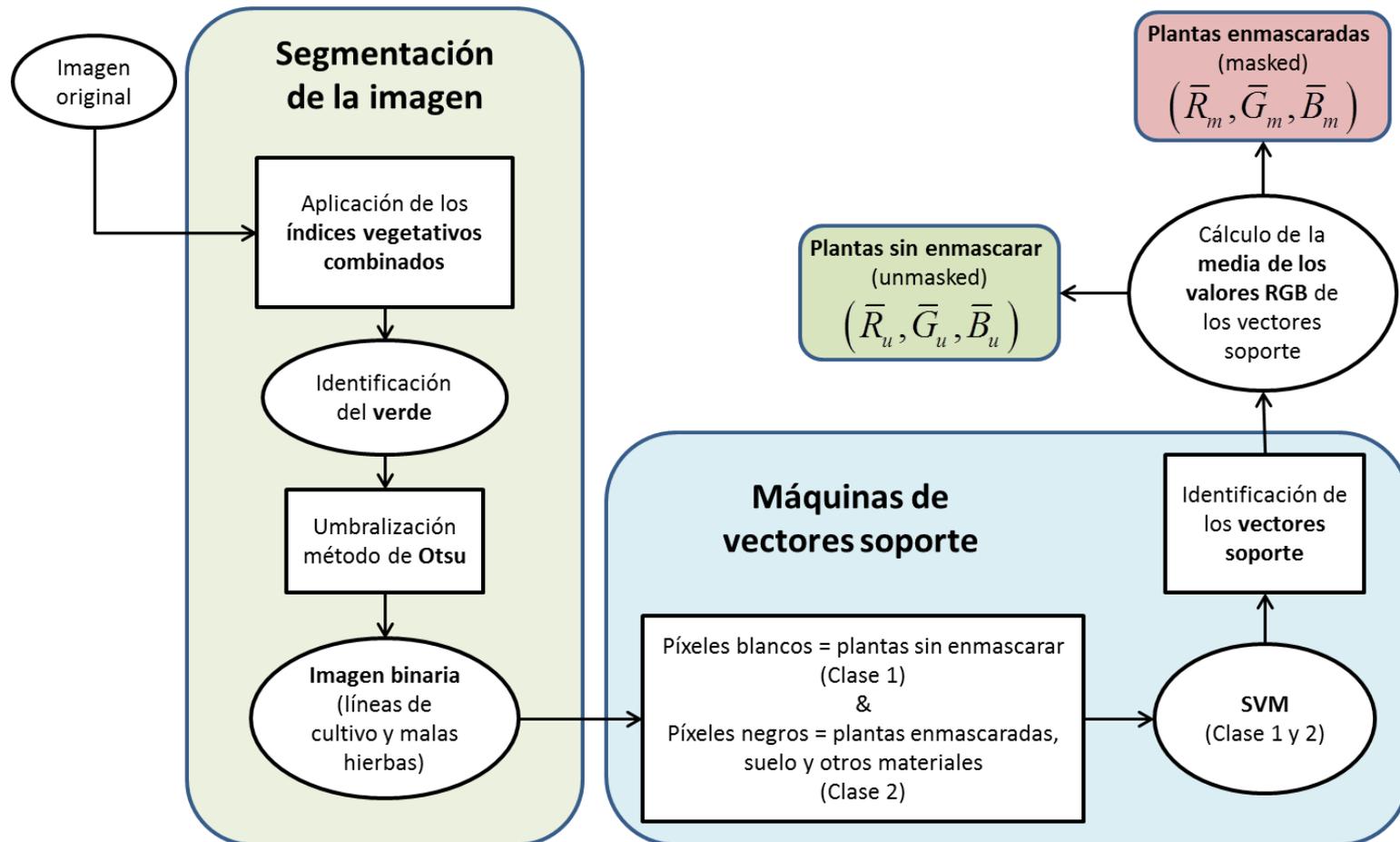
- Eliminar píxeles cercanos al blanco, negro o azul:
 - Blanco o negro: suma de las tres componentes de cada píxel
 - Negro: valor menor que 120
 - Blanco: valor mayor que 500
 - Azul: eliminar píxeles pertenecientes a la crominancia azul



- Resultados:
 - Píxeles correctamente clasificados: 88.6%
 - Tiempo de procesamiento: 93.2 milisegundos
 - Válido para tiempo real
 - Infra-segmentación → no son necesarias operaciones morfológicas

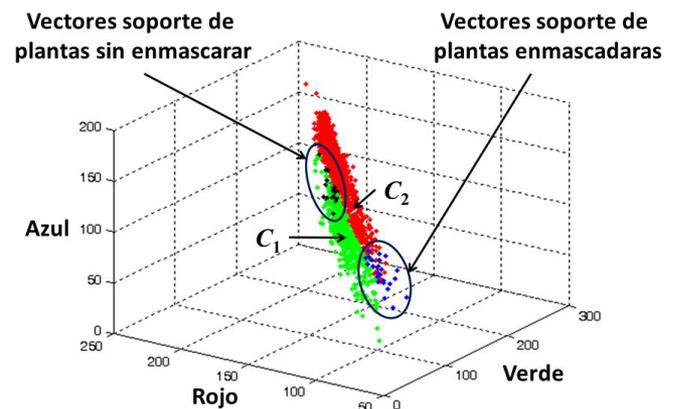
Identificación de plantas enmascaradas y sin enmascarar mediante Máquinas de Vectores Soporte

- Riego natural o artificial
- Proceso de secado tras un tratamiento herbicida



Identificación de plantas enmascaradas y sin enmascarar mediante Máquinas de Vectores Soporte

- Fase de aprendizaje:
 - Identificación del verde mediante la combinación de índices vegetativos
 - Umbralización mediante el método de Otsu → imagen binaria
 - **Clase 1**: píxeles blancos → plantas sin enmascarar
 - **Clase 2**: píxeles negros → plantas enmascaradas, suelo y otros materiales
 - Identificación de los vectores soporte de cada clase:
 - Vectores soporte: patrones más significativos de cada clase
 - **Clase 1**: plantas con cierto grado de verdor
 - Vector soporte de la **Clase 2**: patrones más cercanos a la **Clase 1**
 - Cálculo de los límites entre las clases:
 - Media
 - Desviación estándar



Identificación de plantas enmascaradas y sin enmascarar mediante Máquinas de Vectores Soporte

- Fase de decisión:
 - Plantas: identificación mediante su componente espectral verde
 - Porcentaje de verde de cada conjunto de vectores soporte (r)
 - Desviación con respecto a la componente espectral verde (t)
 - Clasificación:
 - Porcentaje de verde del píxel a clasificar
 - Valor superior al del vector soporte de la **Clase 1** → **planta sin enmascarar**
 - Valor superior o igual al del vector soporte de la **Clase 2** y menor al de la **Clase 1** (valor entre los vectores soporte) → **planta enmascarada**
 - Valor inferior al del vector soporte de la Clase 2 → suelo y otros materiales

SUELO Y RESTO

PLANTAS ENMASCARADAS

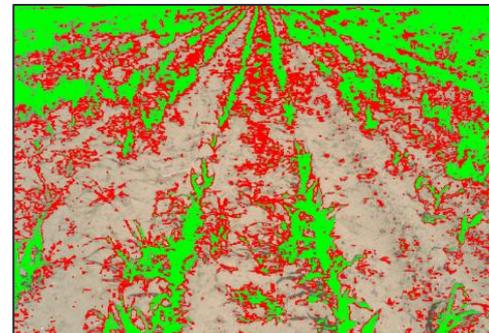
PLANTAS SIN ENMASCARAR

Vectores soporte
Clase 2: $r_{mG}-t_{mG}$

Vectores soporte
Clase 1: $r_{uG}-t_{uG}$

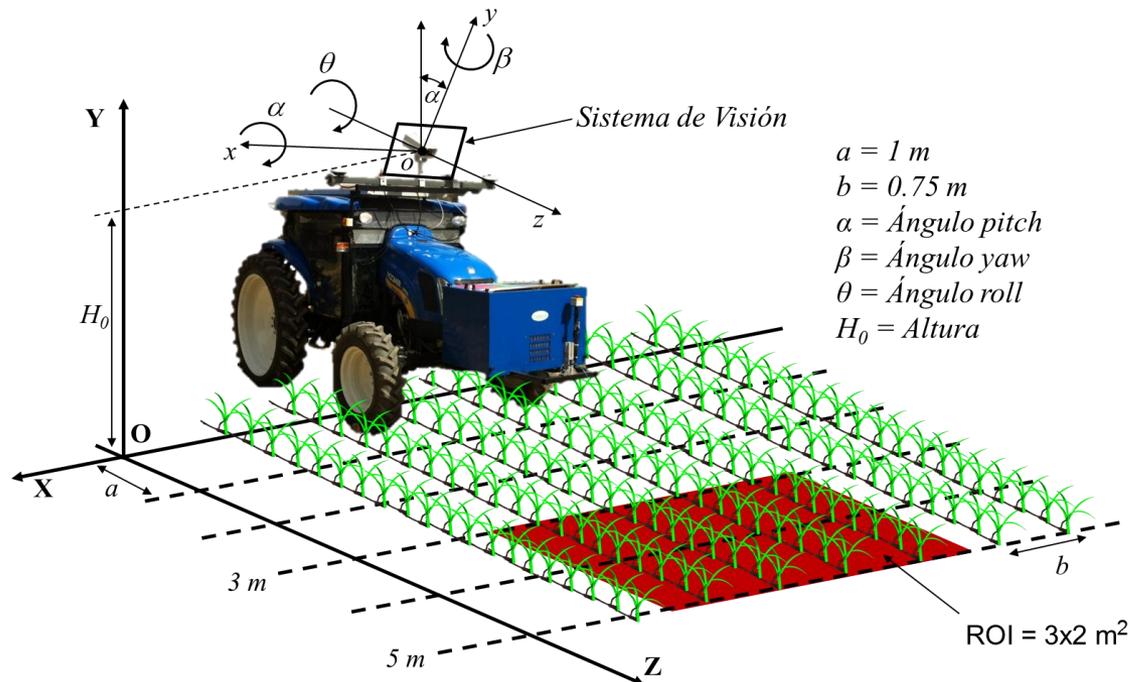
Identificación de plantas enmascaradas y sin enmascarar mediante Máquinas de Vectores Soporte

- Resultados:
 - Fase de aprendizaje:
 - Función de decisión: núcleos (gaussiano, polinomio, sigmoide) → Gaussiano
 - Distancia mínima de los hiperplanos muy pequeña (1.86×10^{-5}) $\sigma^2 = 3.5$
 - Es posible distinguir entre plantas enmascaradas y sin enmascarar
 - Permite un análisis post-tratamiento
 - Porcentaje de éxito del 93.1%



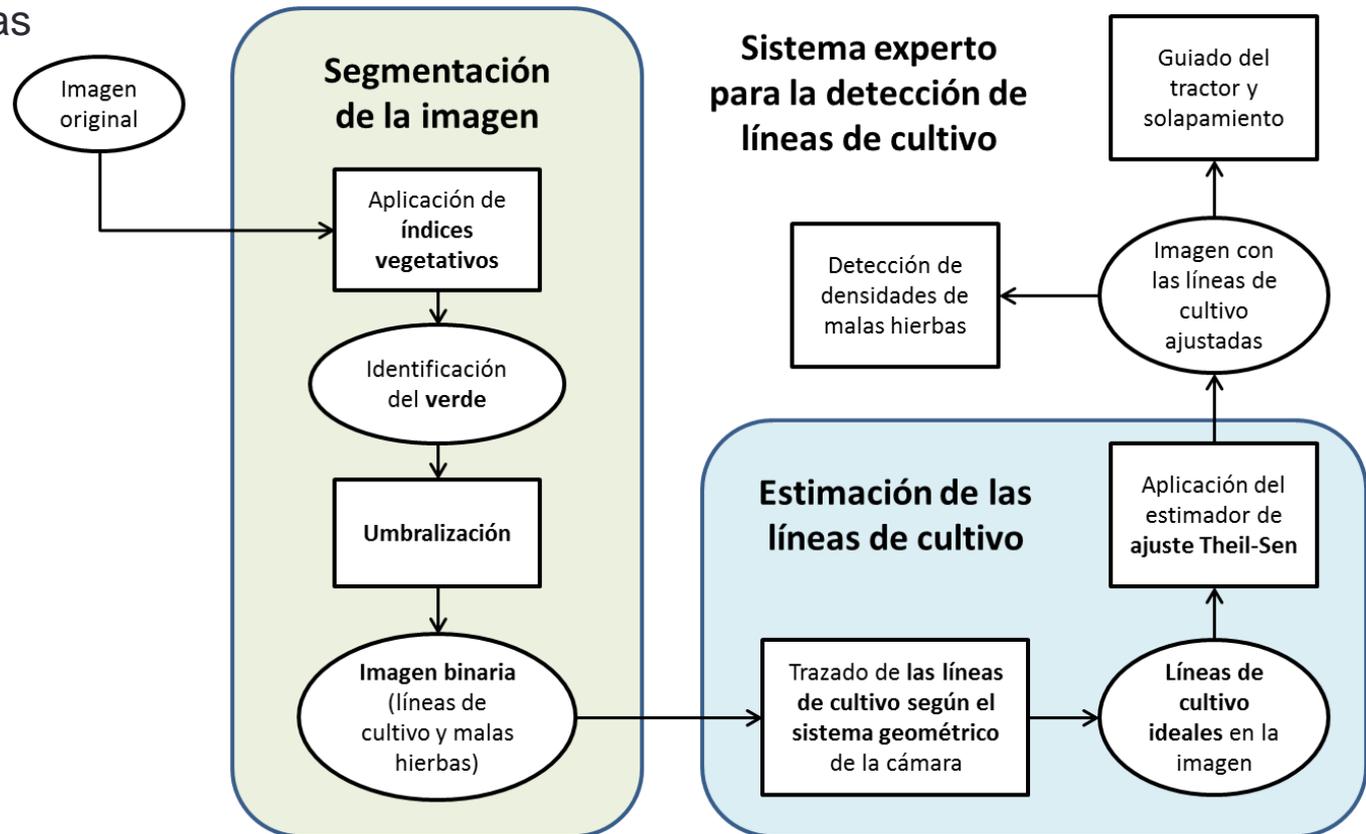
Detección precisa de líneas

- Sistema de visión:
 - Parámetros intrínsecos: longitud focal, centro del plano de la imagen, tamaño del píxel y resolución horizontal y vertical del CCD
 - Parámetros extrínsecos: altura, ángulos de inclinación, número de líneas, distancia de la zona de interés (ROI)



Arquitectura del sistema

- Obtención de una imagen de calidad
- Segmentación y umbralización → imagen binaria
- Detección de líneas mediante la geometría del sistema
- Ajuste de líneas



Detección de líneas mediante geometría

- Parámetros extrínsecos e intrínsecos:

- Ángulos fijos
- Ángulos variables: IMU



- Transformación entre sistemas de coordenadas 3D a 2D

Orientado

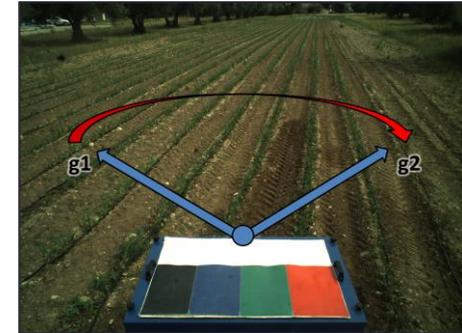


Desviado



Detección de líneas mediante geometría

- Detección de la orientación:
 - Variación del ángulo de guiñada
 - Ángulo de máxima coincidencia de píxeles blancos (verdes) alineados en la imagen binaria



Orientado



Desviado



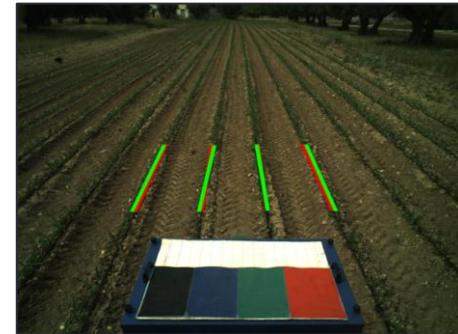
Detección de líneas mediante geometría

- Ajuste de líneas:
 - Sistema geométrico ideal: coinciden las líneas estimadas y reales
 - Situación poco común
 - Dos tipos de relación entre líneas estimadas y reales:
 - Coinciden: validación
 - No coinciden: ajuste de líneas
 - Ajuste de línea recta mediante el estimador Theil-Sen:
 - Distribución de píxeles: búsqueda horizontal píxeles blancos a lo largo de un determinado ancho para cada línea (margen de tolerancia).
 - Ecuación de línea recta: $Y = m \cdot X + b$
 - Pendiente (m): mediana de las pendientes sobre el conjunto de todos los posibles pares de píxeles $(y_j - y_i)/(x_j - x_i)$
 - Término independiente (b): la mediana de los términos independientes $(y_i - mx_i)$ obtenidos con la pendiente m

Detección de líneas mediante geometría

- Ajuste de líneas mediante el estimador Theil-Sen:
 - Detección de la orientación
 - Líneas obtenidas mediante geometría (rojas)
 - Líneas corregidas mediante Theil-Sen (verde)

Orientado



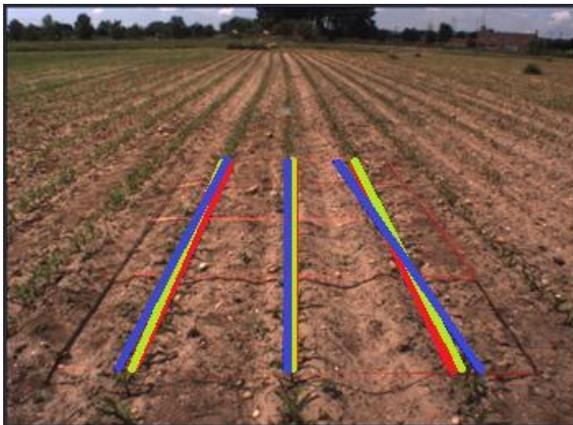
Desviado



Detección de líneas mediante geometría

- Resultados del ajuste de líneas:
 - Líneas obtenidas mediante geometría (**rojo**)
 - Corrección de las líneas mediante:
 - Regresión lineal simple (**azul**)
 - Estimador Theil-Sen (**verde**)
 - Distintos tamaños de la zona de interés
 - Diferentes márgenes de tolerancia
 - Distintos sistemas de visión y parámetros de la zona de interés

Sistema 1:
Cámara BASLER



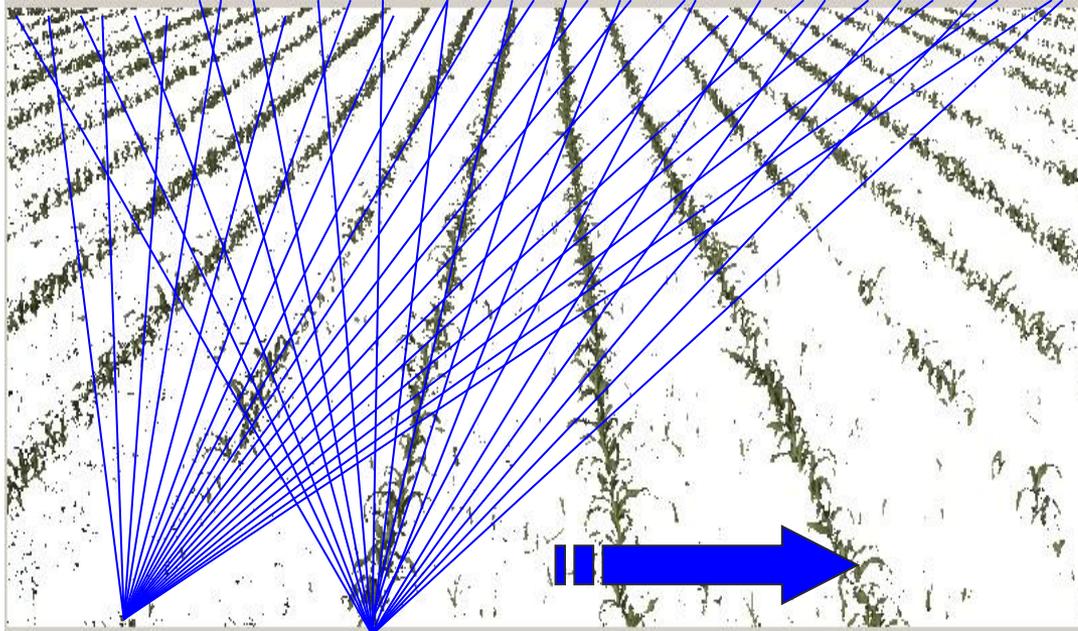
Sistema 2:
Cámara SVS4050



Detección de líneas mediante geometría

- Resultados del ajuste de líneas:
 - Tiempos de proceso
 - Peor caso sistema 1: 571 ms → Velocidad máxima de 25.21 km/h
 - Peor caso sistema 2: 641 ms → Velocidad máxima de 11.23 km/h
 - Válido para tiempo real

Detección de líneas mediante intuición

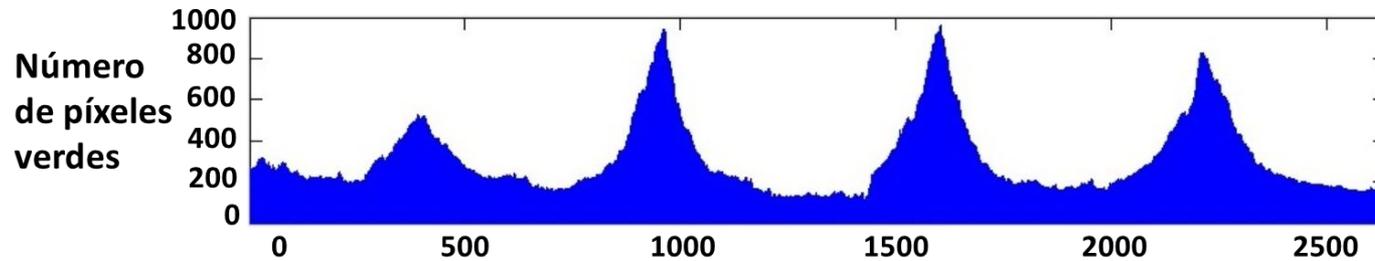


Exploración horizontal

Detección de líneas mediante intuición

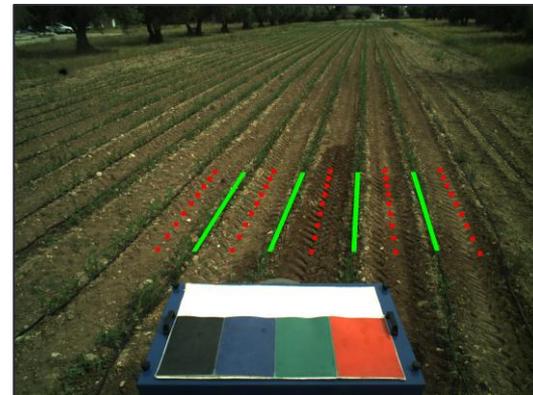
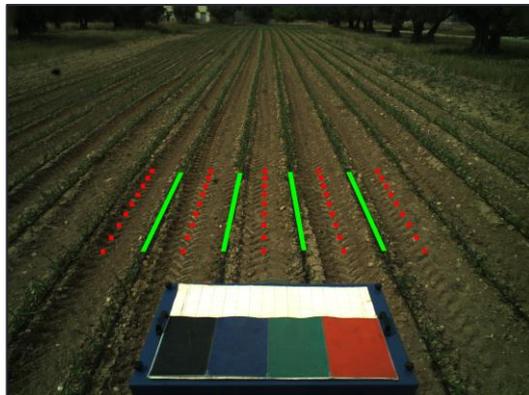


Acumulación de píxeles verdes



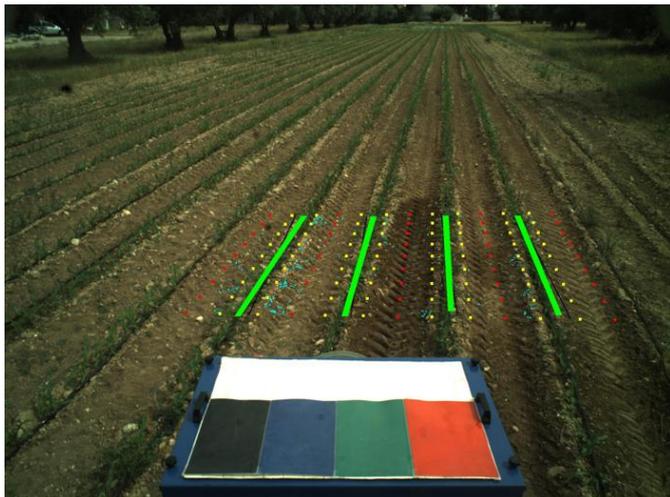
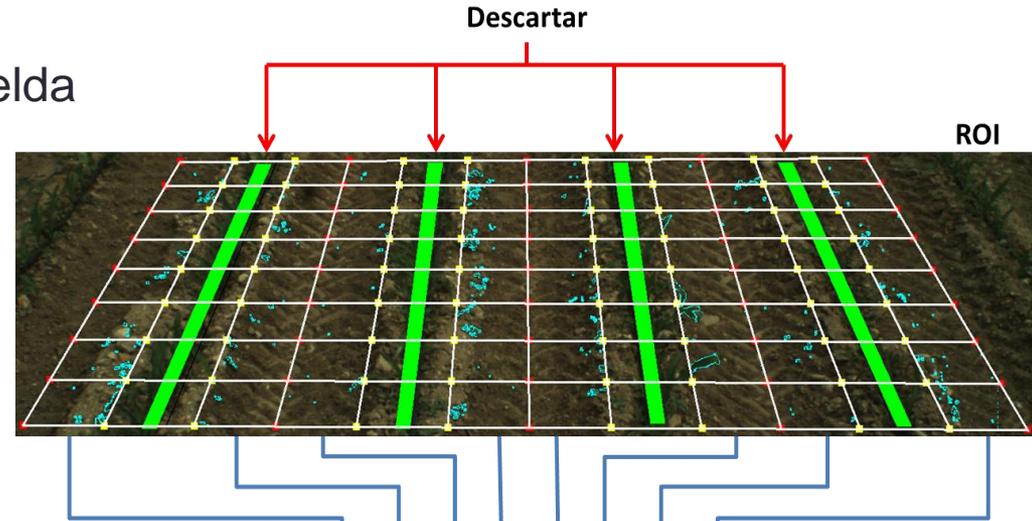
Detección de malas hierbas

- División de la zona de interés en celdas
- Todo píxel de verde identificado en las celdas pertenece a malas hierbas → porcentaje de mala hierbas por celda
- Tras el ajuste de líneas:
 - División vertical: bisectrices de las líneas ajustadas (**puntos rojos**)
 - División horizontal: geometría del sistema
 - Permite mantener la perspectiva



Detección de malas hierbas

- Eliminar el maíz (zona amarilla)
- Calcular el porcentaje de cada celda



2,32	1,41	1,45	5,00	1,24	0,62	3,93	0,51
4,92	0,70	0,00	7,78	2,04	0,11	3,78	2,13
0,00	3,75	1,63	3,45	0,69	2,07	0,90	3,06
1,97	1,39	1,15	3,57	0,66	0,00	0,00	2,23
2,25	0,49	0,44	4,33	3,64	1,84	0,00	4,35
1,68	1,81	0,50	5,20	2,10	3,21	1,92	0,74
5,78	2,03	0,49	0,27	1,89	2,54	1,62	3,92
5,99	1,19	0,86	2,46	1,37	0,00	0,72	4,13

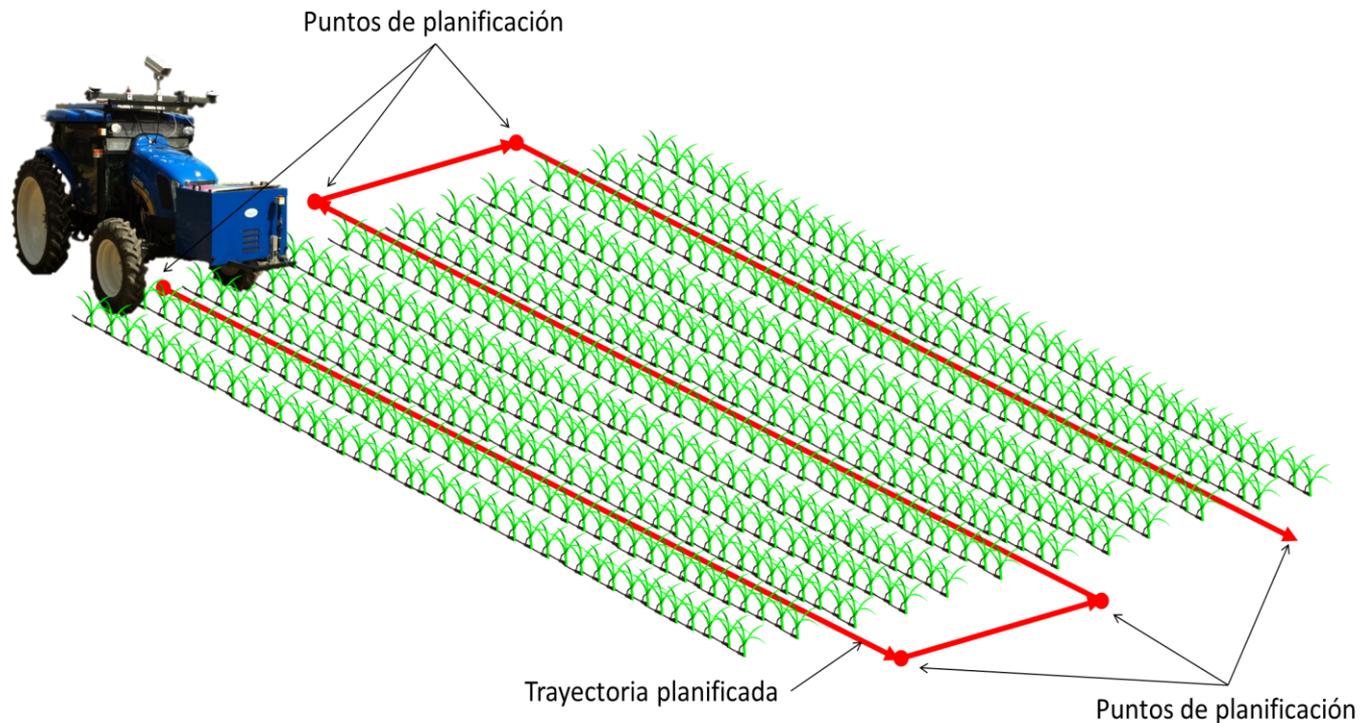
Matriz de porcentajes

alto

ancho

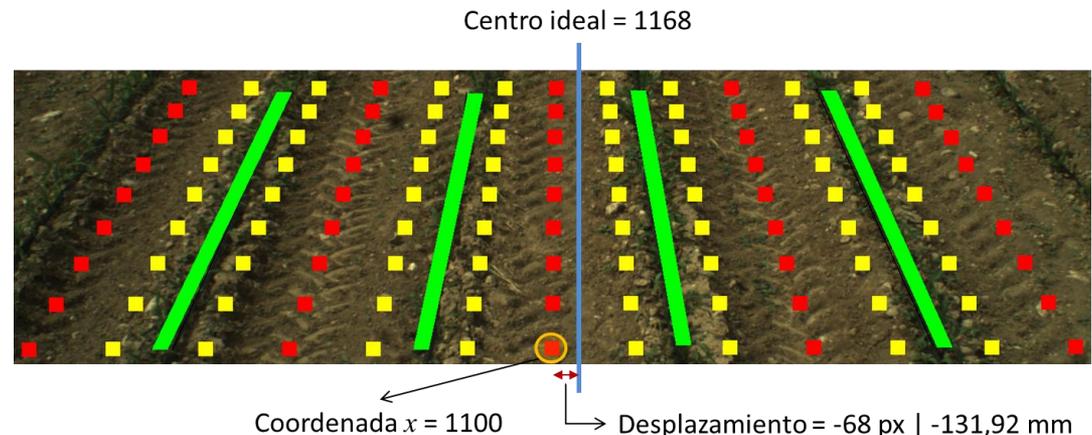
Guiado

- Tractor autónomo → no pisar las líneas de cultivo:
 - El maíz no tiene capacidad de recuperación y su siembra cambia cada año
 - Fallo en la comunicación GPS
 - Errores de cálculo en las posiciones obtenidas por el planificador



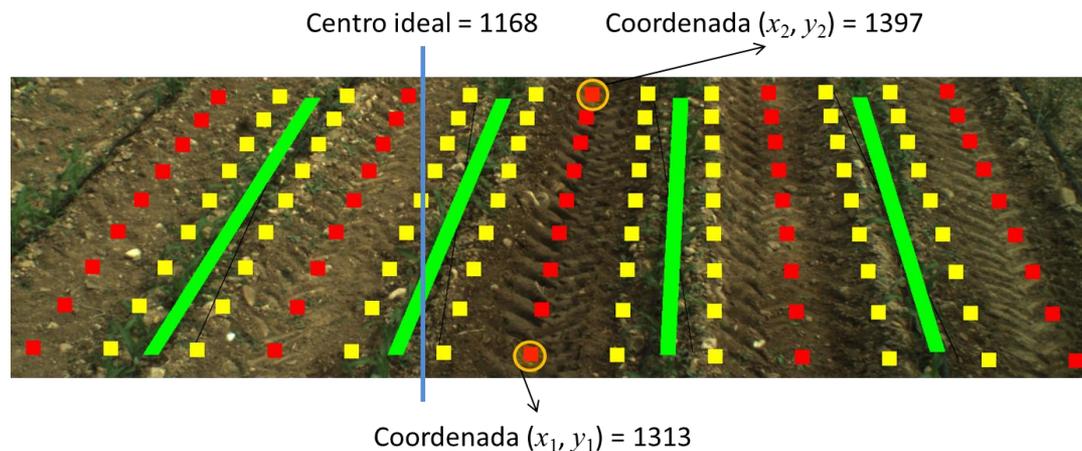
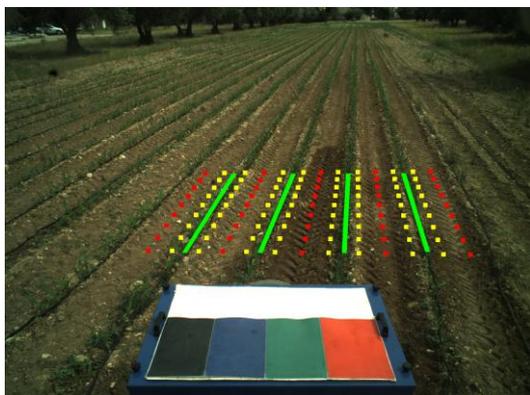
Guiado – seguimiento de líneas

- Una vez obtenida la matriz de malas hierbas:
 - Se observa el desplazamiento con respecto al centro de la imagen:
 - Número de líneas pares: bisectriz de las líneas centrales
 - Número de líneas impares: línea central
 - Conversión píxel-milímetro:
 - Valor positivo: corregir desplazando a la derecha
 - Valor negativo: corregir desplazando a la izquierda



Guiado – aproximación al campo

- Bisectriz o línea central: orientación desde el punto actual al punto de salida definido por el planificador
- Aplicar corrección para situar al tractor en (x_1, y_1) con dirección a (x_2, y_2)
- Aplicar el seguimiento de líneas

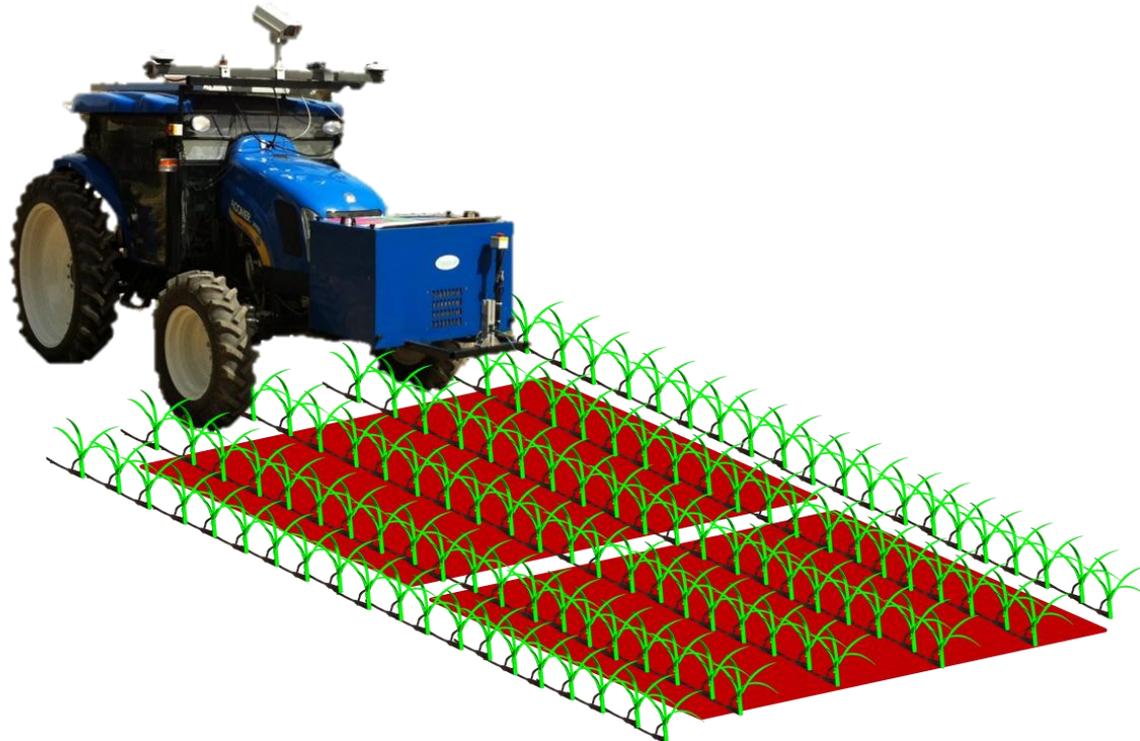


Guiado – aproximación al campo

- Resultados (desviación estándar):
 - Seguimiento de distintas trayectorias manualmente
 - Comparación entre la trayectoria manual y realizada de forma autónoma
 - Altura del maíz:
 - Baja (1-4 cm): 7.7 cm
 - Media / alta (> 4 cm): 10.2 cm
 - General: permite desplazamientos de hasta 40 centímetros respecto a los puntos ideales del planificador

Solapamiento

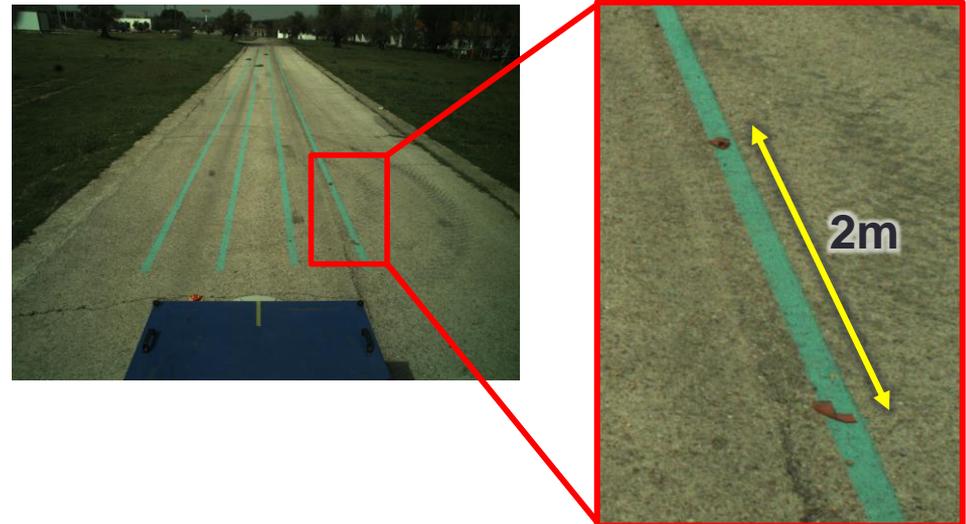
- Agricultura de Precisión → Tratamiento específico por zonas
- Obtención de la distancia entre la última imagen procesada y la posición actual



Solapamiento

- **Ideal**: cuando la distancia es igual al largo de la zona de interés, se analiza una nueva imagen
- **Realidad**: cuando la distancia es igual al largo de la zona de interés teniendo en cuenta el error del sistema GPS
 - Desviación típica: calculada en estático adquiriendo coordenadas (3 cm)

- **Resultados:**
 - Georreferenciación manual de las zonas de interés
 - Comparación con las coordenadas de cada captura siguiendo una trayectoria planificada
 - **Desfase promedio**: 10 cm





**GRACIAS
POR SU ATENCIÓN**

