El **sulforafano (SFN)** es un isotiocianato alifático derivado de la hidrólisis enzimática (vía mirosinasa) del glucosinolato *glucorafanina*, característico de las crucíferas (*Brassicaceae*). En la protección vegetal, actúa a través de una triple vía: **toxicidad celular de choque**, **atenuación de virulencia y biofilms (efecto anti-agregante)** y **activación de la inmunidad sistémica (resistencia inducida)**.

1. Mecanismo Biocida Directo: Inactivación Enzimática y Estrés Oxidativo

El sulforafano presenta un grupo funcional altamente reactivo ($-N=C=S$) con fuerte afinidad electrofílica:

- **Bloqueo de grupos tiol ($-SH$):** Reacciona de forma espontánea con residuos de cisteína en enzimas metabólicas críticas del patógeno. Esto provoca:
  - Desnaturalización de proteínas estructurales y transportadores de membrana.
  - Colapso de la respiración mitocondrial (inhibición de citocromos y de la cadena de transporte de electrones).
  - Inhibición de enzimas glucolíticas clave en hongos fitopatógenos y bacterias.
- **Lisis y fuga electrolítica:** Modifica la polaridad y fluidez de la bicapa lipídica, provocando la pérdida de la integridad de la membrana plasmática. Esto deriva en la salida masiva de iones (K^+, Mg^{2+}) y nutrientes, colapsando el equilibrio osmótico celular.
- **Sobrecarga de Especies Reactivas de Oxígeno (ROS):** Desencadena un estallido oxidativo intracelular no regulado en el patógeno, induciendo peroxidación lipídica, daño en el ADN y apoptosis o necrosis celular.

INTRACEA®

2. Atenuación de Virulencia y Acción Anti-agregante Biótica

Más allá de la toxicidad directa, el sulforafano interfiere en la capacidad invasiva de los microorganismos sin requerir necesariamente una dosis letal inmediata:

- **Inhibición de estructuras de infección fúngica:**
  - Frena la germinación de conidios y esporas.
  - Suprime la elongación del tubo germinativo y aborta la diferenciación del apresorio, impidiendo que el hongo ejerza la presión mecánica y enzimática necesaria para penetrar la cutícula vegetal.
- **Disrupción de *Quorum Sensing* y Biofilms bacterianos:**
  - Interfiere en las señales químicas de comunicación intercelular bacteriana (N-acil homoserina lactonas - AHL), impidiendo que la población patógena sincronice el

ataque tisular.
    - Inhibe la producción de exopolisacáridos (EPS), responsables de la formación de la matriz mucosa del biofilm. Sin esta barrera protectora, las bacterias quedan expuestas a las defensas endógenas de la planta y pierden capacidad de anclaje vascular y epifítico.
- **Inactivación de enzimas de maceración tisular:** Neutraliza las enzimas degradativas de la pared celular secretadas por patógenos (endopoligalacturonasas, pectatoliasas, celulasas), deteniendo el avance de pudriciones blandas y chancros acuosos.

3. Inducción de Defensas Endógenas de la Planta (SAR / ISR)

El sulforafano actúa como un potente **elicitor molecular** que alerta el sistema defensivo del cultivo:

- **Cebado (*Priming*) inmunitario:** Activa de forma simultánea las rutas hormonales del ácido salicílico (SA) y del ácido jasmónico/etileno (JA/ET).
- **Sobreexpresión de proteínas PR (*Pathogenesis-Related*):** Induce la síntesis endógena de quitinasas, β-1,3-glucanasas y defensinas en tejidos circundantes y distales, preparándolos para degradar paredes fúngicas antes de que progrese el inóculo.
- **Refuerzo de pared celular:** Estimula la acumulación de callosa en puntuaciones y estomas, así como la lignificación periférica para delimitar físicamente las lesiones.

INTRAGEA®

4. Espectro de Acción frente a Patógenos Agrícolas

Tipo de Patógeno	Especies Diana Representativas	Efecto Principal del Sulforafano
Hongos Foliares y de Cuello	*Botrytis cinerea*, *Alternaria alternata*, *Sclerotinia sclerotiorum*, *Colletotrichum* spp.	Bloqueo de germinación conidial, lisis micelial e inhibición de esclerocios.
Hongos Vasculares y de Raíz	*Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia solani*, *Verticillium dahliae*	Supresión de microconidios, reducción de colonización xilemática.
Bacteriosis	*Erwinia amylovora*, *Pseudomonas syringae*,	Supresión de biofilms, bloqueo de motilidad (flagelar/swarming) e

Tipo de Patógeno	Especies Diana Representativas	Efecto Principal del Sulforafano
	Xanthomonas campestris, *Pectobacterium* spp.	inhibición de pudrición acuosa.
Oomicetos	*Phytophthora infestans*, *Phytophthora capsici*, *Pythium ultimum*	Inmovilización de zoosporas flageladas y lisis de esporangios.

...

INTRAGEA®