



# ***Análisis comparativo de la estimación del canal en sistemas de MIMO masivo con desvanecimiento Rician correlacionado y no correlacionado***

Ing. Arellano Carvajal Jorge

Maestría de Investigación en Electrónica  
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE  
[jfarellano@espe.edu.ec](mailto:jfarellano@espe.edu.ec)

Junio - 2023



**CREE EN TI Y TODO SERÁ  
POSIBLE**



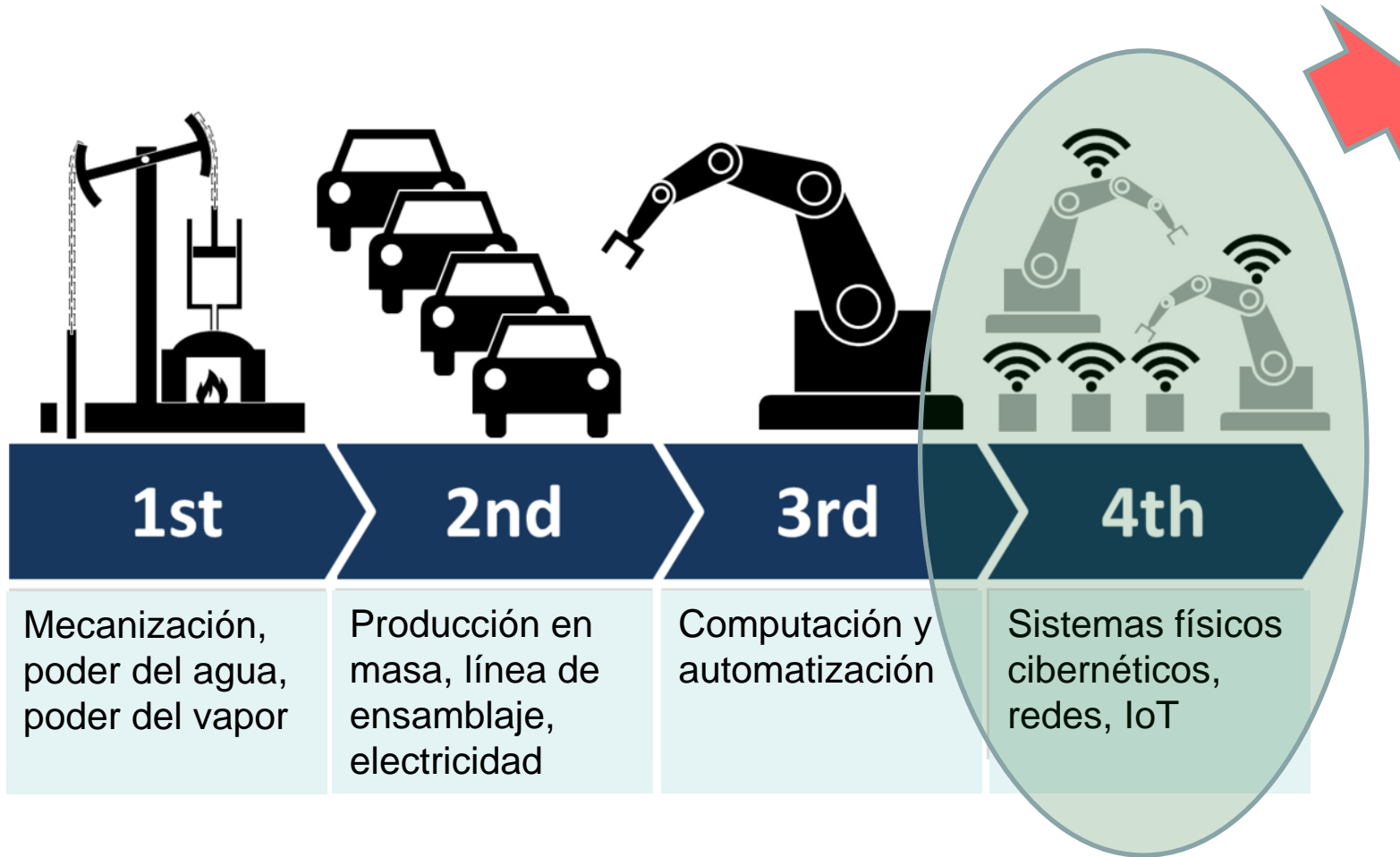
- OBJETIVO GENERAL
- INTRODUCCIÓN
- MIMO MASIVO (M-MIMO)
- DESVANECIMIENTO RICIAN
- FACTOR DE REDUCCIÓN DE INTERFERENCIA (IRF)
- CORRELACIÓN ESPACIAL DEL CANAL
- ESTIMACIÓN DEL CANAL
- CONCLUSIONES



Analizar la estimación de canal a través del NMSE de los diferentes esquemas de estimación imperfecta del canal en el UL de un sistema M-MIMO unicelular con TDD, en escenarios con desvanecimiento tipo Rayleigh y Rician, con y sin correlación espacial de los coeficientes de canal.



# INTRODUCCIÓN



- Todo interconectado
- Baja latencia
- Altas velocidades

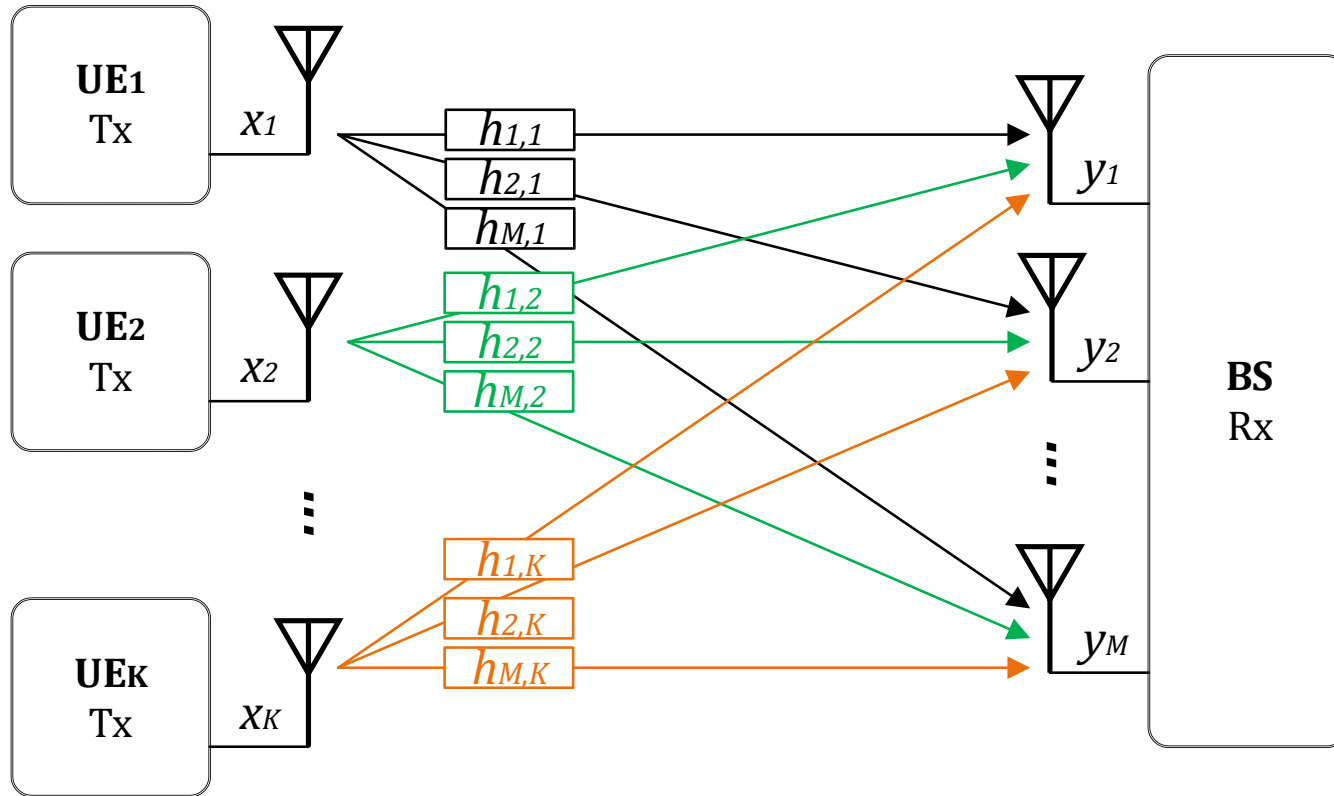
**5G**  
(2020s)

- Eficiencia espectral (SE),
- Eficiencia energética (EE),
- Eficiencia de hardware (HE),
- Confiabilidad y
- Seguridad

**M-MIMO**



# MIMO MASIVO (M-MIMO)



$$\mathbf{y} = \sqrt{P} \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{n}$$

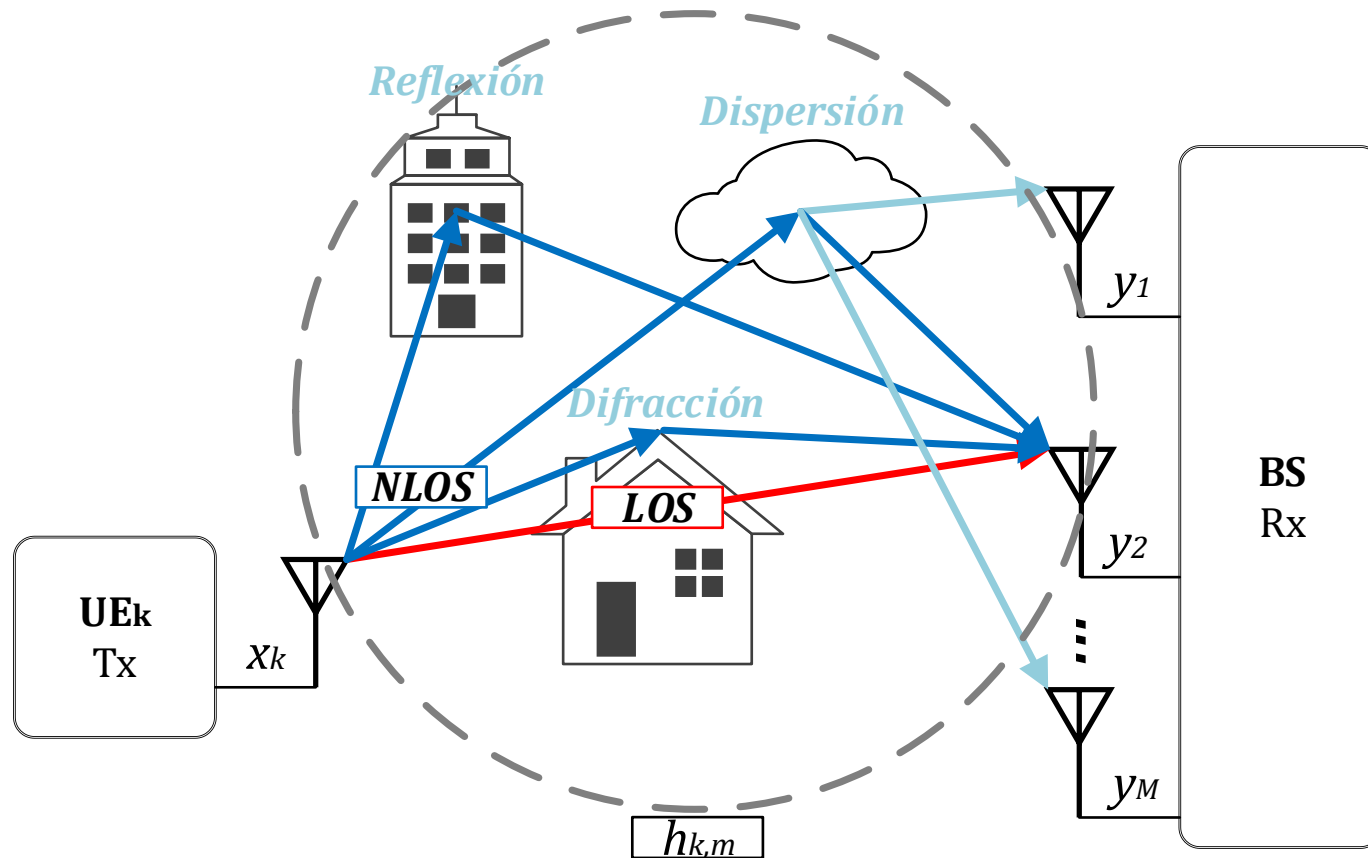
$$\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_n^2)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \dots & h_{1,K} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \dots & h_{2,K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M,1} & h_{M,2} & \dots & h_{M,K} \end{bmatrix}$$

DESVANECIMIENTO A  
PEQUEÑA ESCALA POR  
MÚLTIPLES TRAYECTOS



# DESVANECIMIENTO RICIAN



**NLOS = RAYLEIGH**

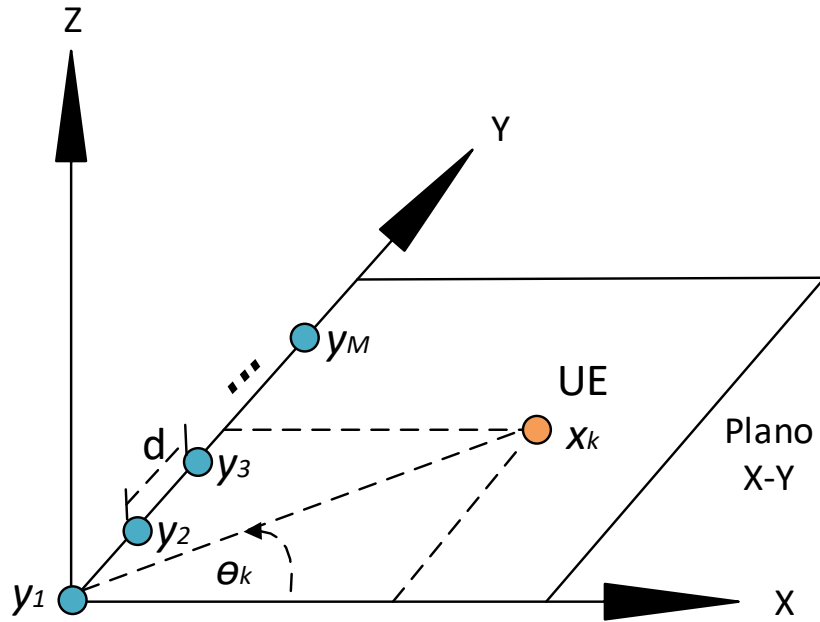
$$\rho_{m,k} = g_{m,k,1} + jg_{m,k,2} \quad \rho_{m,k} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_k^2)$$

**RICIAN = LOS + NLOS**

$$h_{m,k} = \sqrt{\frac{\mathcal{K}_k}{\mathcal{K}_k + 1}} \rho_{m,k} + \sqrt{\frac{1}{\mathcal{K}_k + 1}} \rho_{m,k}$$

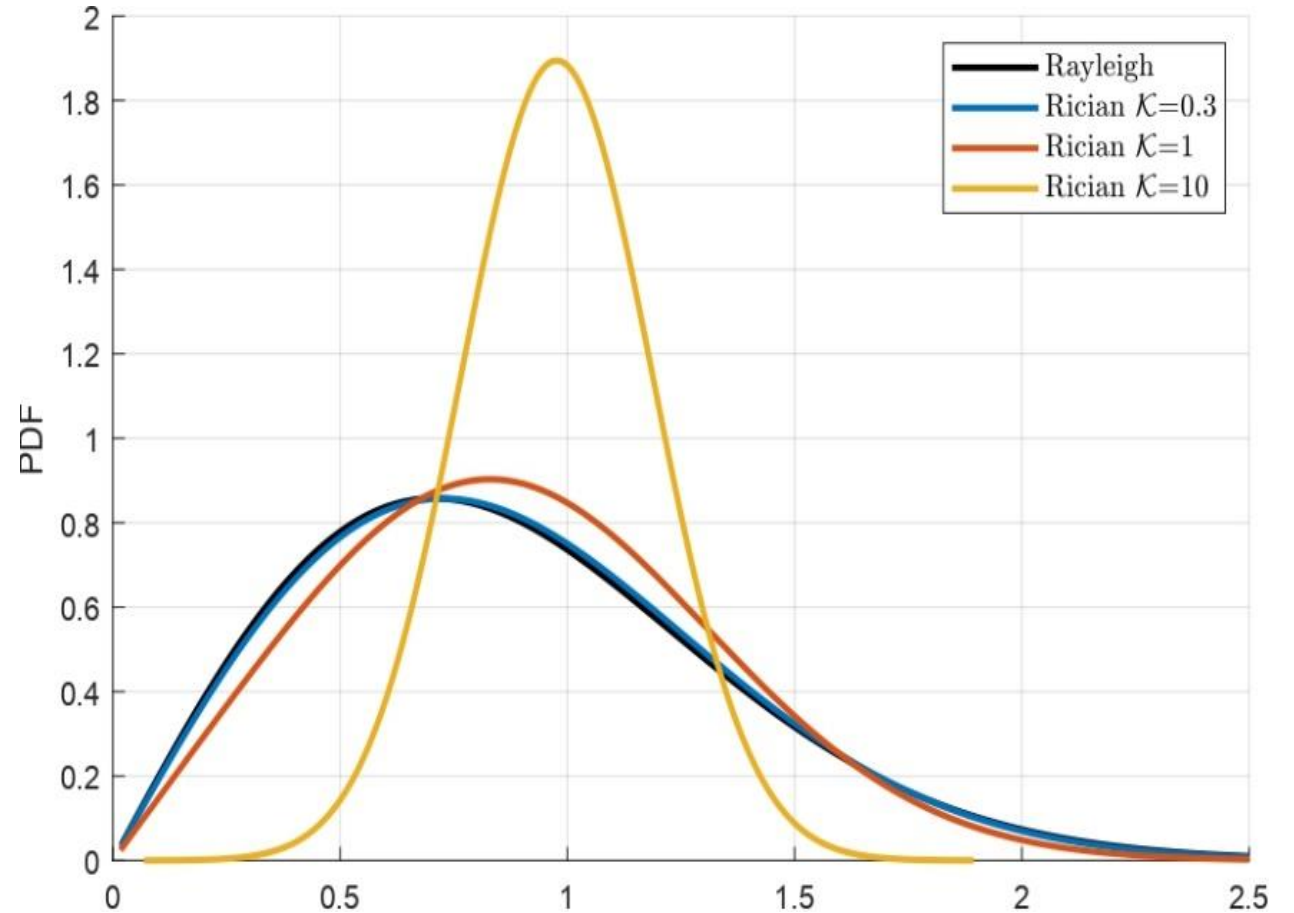
$$h_{m,k} \sim \mathcal{NC}\left(\sqrt{\frac{\mathcal{K}_k}{\mathcal{K}_k + 1}} \rho_{m,k}, \frac{\sigma_k^2}{\mathcal{K}_k + 1}\right)$$





LOS

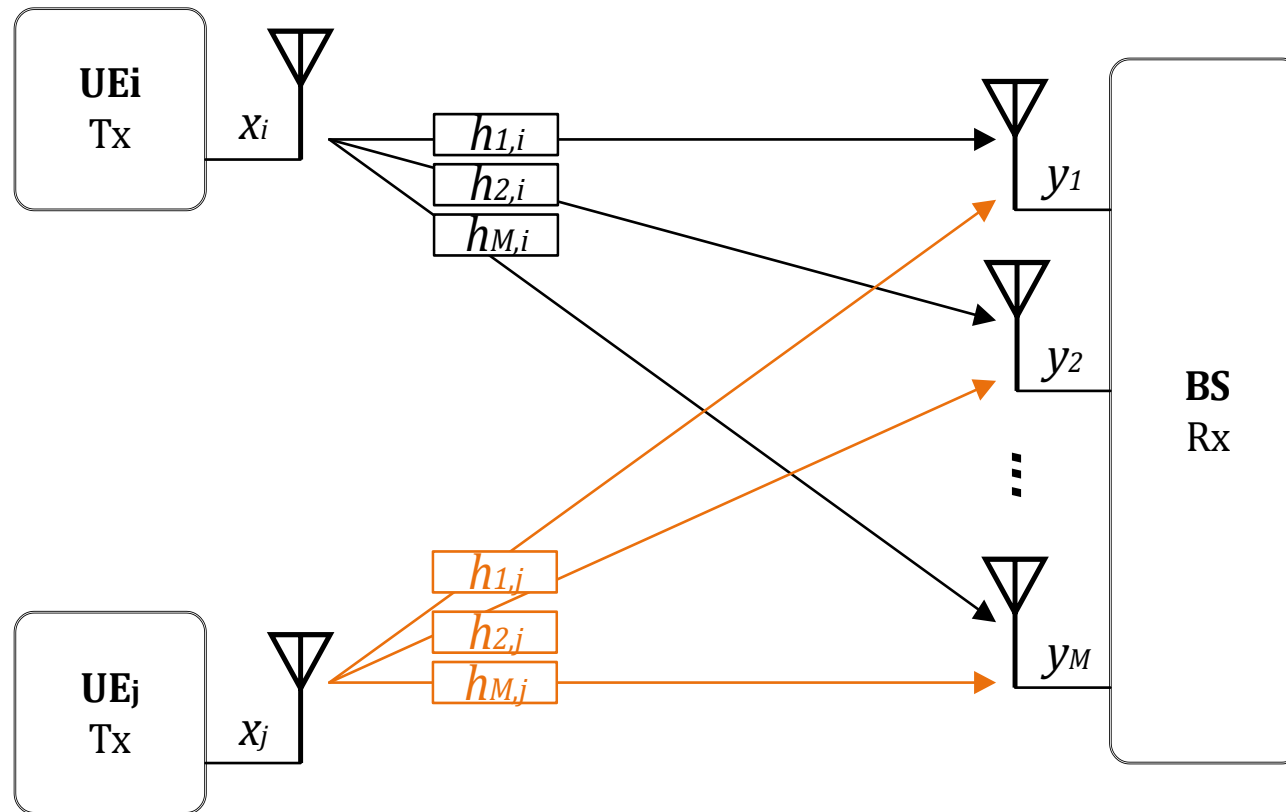
$$Q_{m,k} = \exp\left(\frac{-j2\pi d(m-1)\sin\theta_k}{\lambda}\right) = 1$$





# FACTOR DE REDUCCIÓN DE INTERFERENCIA (IRF)

Es un indicador clave de rendimiento (KPI), puesto que permite evaluar el rendimiento de sistemas M-MIMO, ya que indica el número de veces que la interferencia se reduce debido al número de antenas en el receptor.



## ESCENARIO 2-D

$$\Upsilon = E \left\{ \frac{|\mathbf{h}_i^H \mathbf{h}_j|^2}{|\mathbf{h}_i^H \mathbf{h}_i|^2} \right\}$$

## RAYLEIGH

$$\gamma = \frac{1}{M}$$

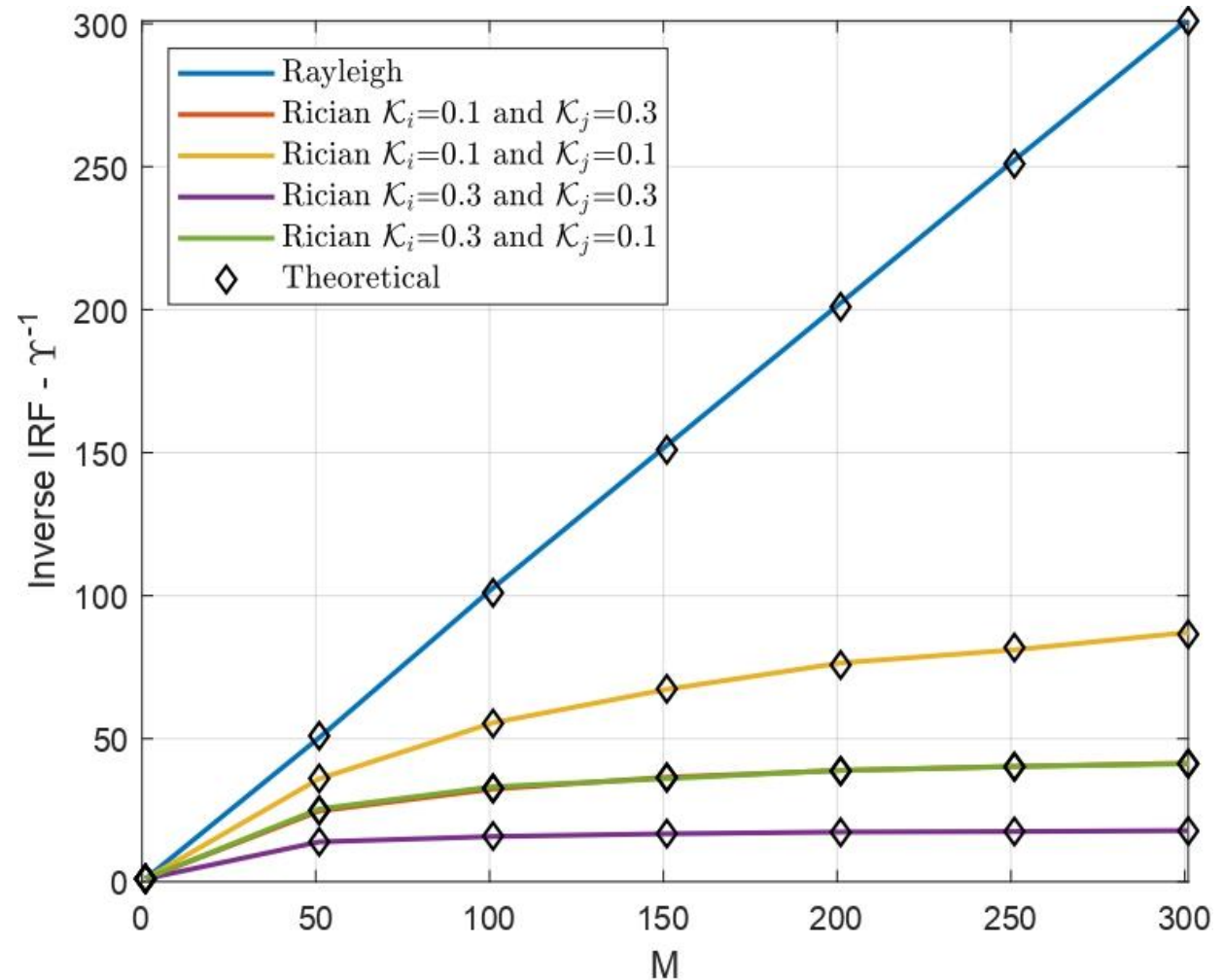


$$\Upsilon = E \left\{ \frac{|\mathbf{h}_i^H \mathbf{h}_j|^2}{|\mathbf{h}_i^H \mathbf{h}_i|^2} \right\}$$

## RICIAN

$$\Upsilon = \frac{(\mathcal{K}_i + 1)(\mathcal{K}_i + \sigma_i^2)(\mathcal{K}_j + \sigma_j^2) + (M - 1)(\mathcal{K}_i + 1)\mathcal{K}_i\mathcal{K}_j}{M(\mathcal{K}_i + \sigma_i^2)^2(\mathcal{K}_j + 1)}$$

$$\mathcal{K}_i \neq \mathcal{K}_j \text{ y } \sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$$

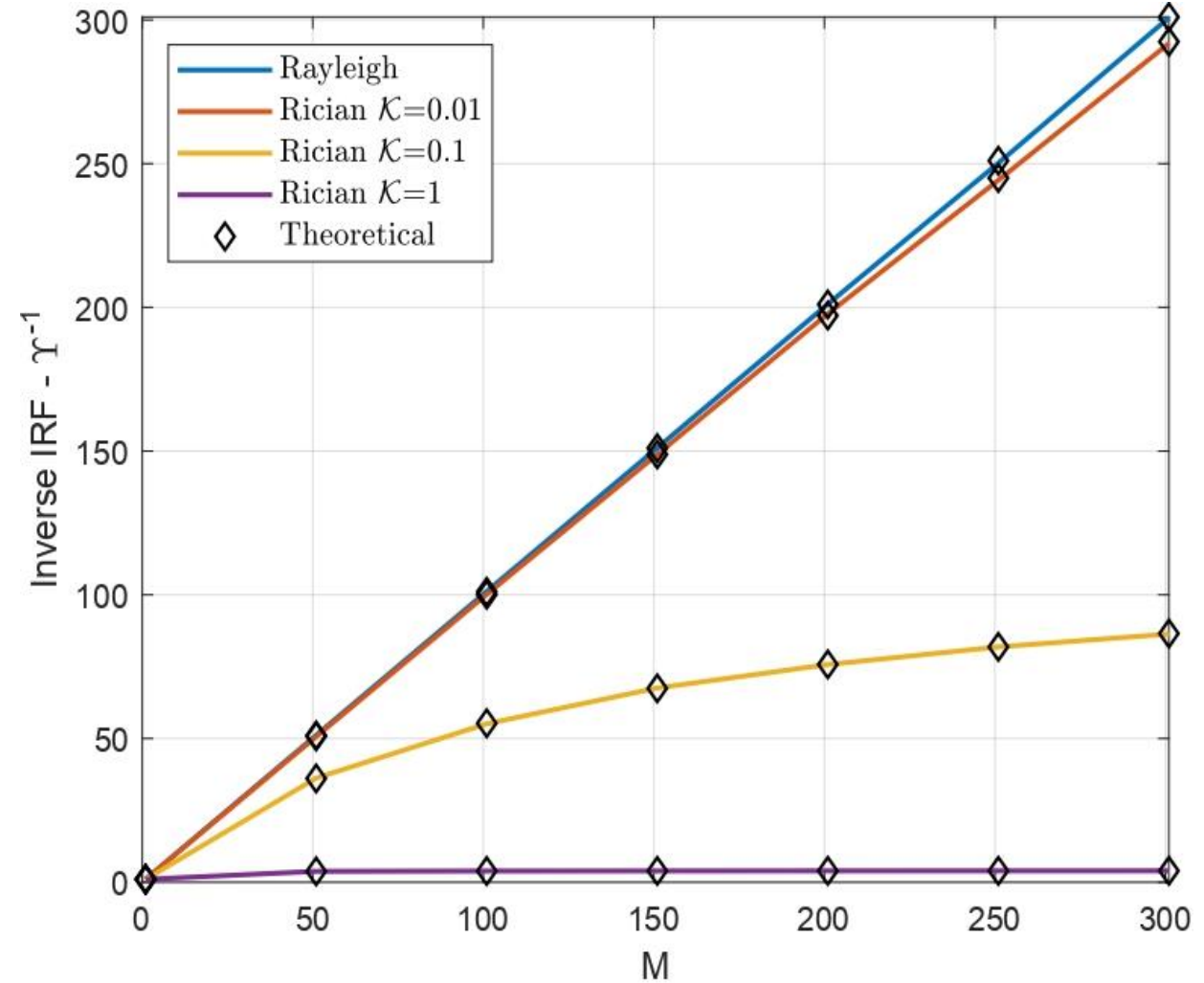


$$\Upsilon = E \left\{ \frac{|\mathbf{h}_i^H \mathbf{h}_j|^2}{|\mathbf{h}_i^H \mathbf{h}_i|^2} \right\}$$

## RICIAN

$$\Upsilon = \frac{1}{M} \left( 1 + (M - 1) \frac{\mathcal{K}^2}{(\mathcal{K} + \sigma^2)^2} \right)$$

$$\mathcal{K}_i = \mathcal{K}_j \text{ y } \sigma_i^2 = \sigma_j^2$$



## RICIAN

### Comportamiento asintótico

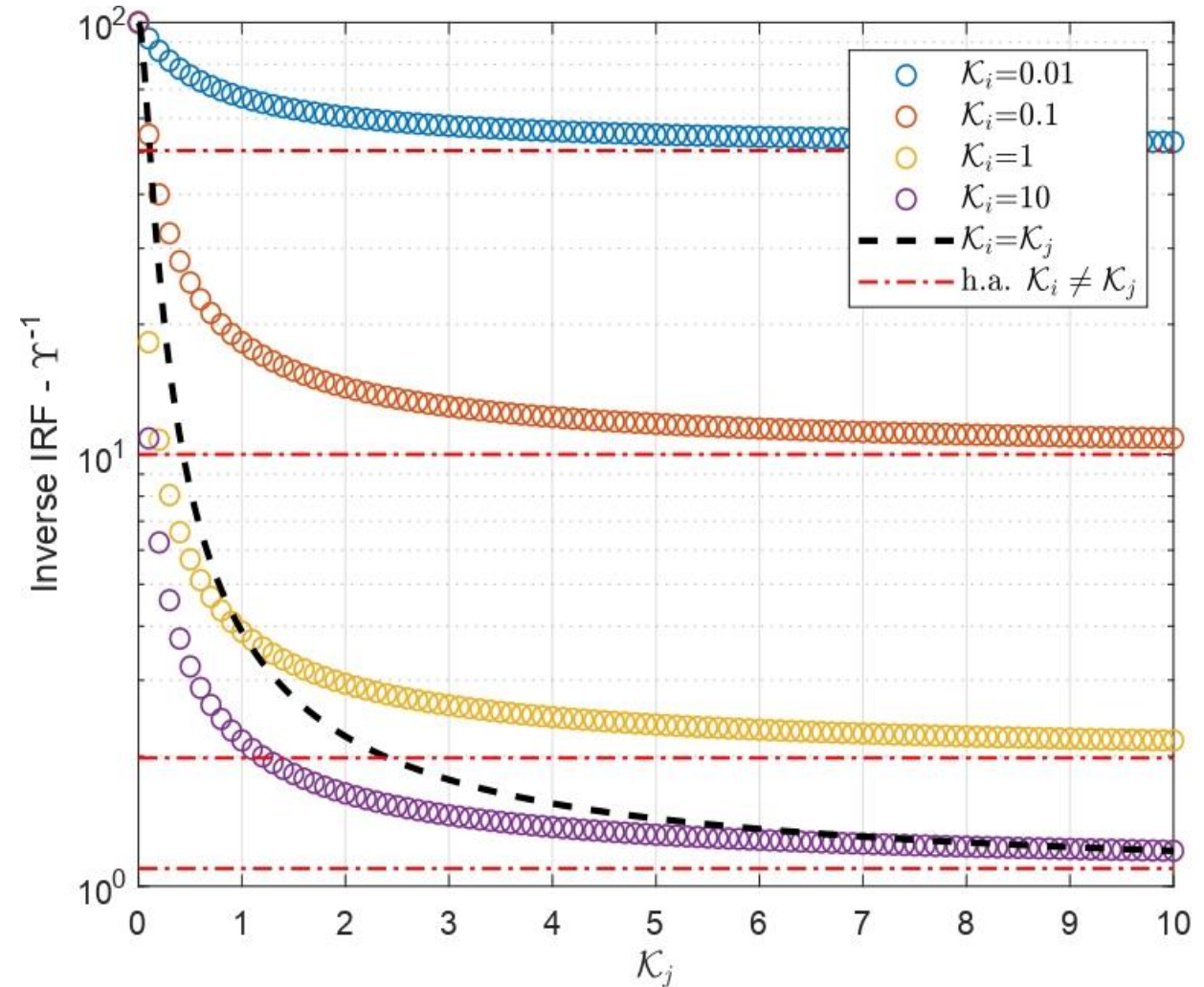
$$\gamma_{\mathcal{K}_j \rightarrow \infty} = \frac{(\mathcal{K}_i + 1)(\mathcal{K}_i + \sigma_i^2) + (M - 1)(\mathcal{K}_i + 1)\mathcal{K}_i}{M(\mathcal{K}_i + \sigma_i^2)^2}$$

$$\mathcal{K}_i \neq \mathcal{K}_j$$

$$\gamma_{\mathcal{K} \rightarrow \infty} = 1$$

$$\mathcal{K}_i = \mathcal{K}_j$$

$$M = 100$$

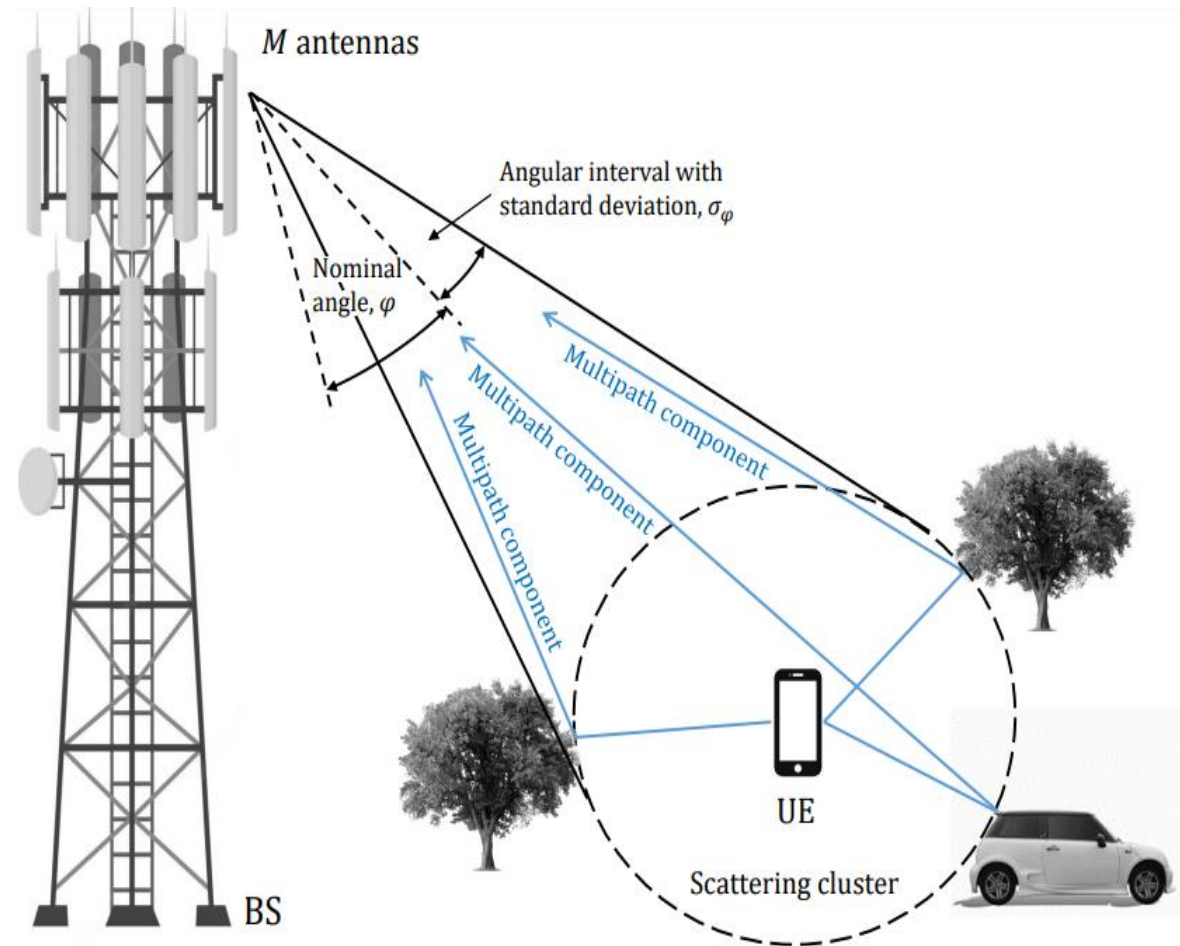


$$\bar{\mathbf{H}} = \mathbf{R}^{\frac{1}{2}} \mathbf{H}$$

$\mathbf{R}$  es la matriz de correlación espacial, la cual describe los efectos macroscópicos de la propagación, incluyendo los patrones de radiación y ganancias de las antenas; además, introduce dispersión local en diferentes ángulos, mediante distribuciones angulares: **Gaussianas**, Laplacianas o Uniformes.

$$r_{l,m} = \exp(j2\pi d(l-m)\sin(\varphi)) \exp\left(-\frac{\sigma_{\varphi}^2}{2} (2\pi d(l-m)\cos(\varphi))^2\right)$$

*Björnson, E., Hoydis, J., & Sanguinetti, L. (2017). Massive MIMO networks: Spectral, energy, and hardware efficiency. Foundations and Trends in Signal Processing*



$$\bar{\mathbf{Y}} = \sum_{k=1}^K \sqrt{P} \mathbf{h}_k \Phi_k^T + \mathbf{N}$$

La estimación del canal a través de pilotos es el método principal para obtener la información del estado del canal (CSI)

$$\tilde{\mathbf{y}}_k = \bar{\mathbf{Y}} \Phi_k^* = \sum_{k=1}^K \tau \sqrt{P} \mathbf{h}_k + \mathbf{N} \Phi_k^* \quad \Phi_k^T \Phi_k^* = \tau$$

## LIBRO DE PILOTOS

$$\Phi = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_K] = \begin{bmatrix} \phi_{1,1} & \phi_{1,2} & \dots & \phi_{1,K} \\ \phi_{2,1} & \phi_{2,2} & \dots & \phi_{2,K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{\tau,1} & \phi_{\tau,2} & \dots & \phi_{\tau,K} \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} \|\Phi\|_2^2 &= \tau \\ \Phi^H \Phi &= \tau \mathbf{I}_\tau \\ |\phi_{l,k}| &= 1 \end{aligned}$$

Secuencias piloto ortogonales



## ESTIMADOR ERROR CUADRÁTICO MEDIO MÍNIMO (MMSE)

$$\hat{\mathbf{h}}_k = \text{Cov}\{\bar{\mathbf{h}}_k \tilde{\mathbf{y}}_k^H\} \text{Cov}\{\tilde{\mathbf{y}}_k \tilde{\mathbf{y}}_k^H\}^{-1} \tilde{\mathbf{y}}_k = \sqrt{P} \text{Cov}\{\bar{\mathbf{h}}_k\} \Psi \tilde{\mathbf{y}}_k$$

$$\Psi = (\tau P \text{Cov}\{\bar{\mathbf{h}}_k\} + \sigma_n^2 \mathbf{I}_M)^{-1}$$

## MATRIZ DE COVARIANZA DEL CANAL CON CORRELACIÓN ESPACIAL

$$\text{Cov}\{\bar{\mathbf{h}}_k\} = E\{\bar{\mathbf{h}}_k \bar{\mathbf{h}}_k^H\} - E\{\bar{\mathbf{h}}_k\} E\{\bar{\mathbf{h}}_k^H\} = E\{\bar{\mathbf{h}}_k \bar{\mathbf{h}}_k^H\} - E\{\bar{\mathbf{h}}_k\}^2$$

RICIAN

RAYLEIGH

$$\text{Cov}\{\bar{\mathbf{h}}_k\} = \frac{\sigma_k^2}{\mathcal{K}_k + 1} \mathbf{R}$$

$$\text{Cov}\{\bar{\mathbf{h}}_k\} = \sigma_k^2 \mathbf{R}$$





## MATRIZ DE COVARIANZA DEL ERROR DE ESTIMACIÓN

$$\mathbf{e} = \bar{\mathbf{h}}_k - \hat{\mathbf{h}}_k$$

## MATRIZ DE COVARIANZA DEL ERROR DE ESTIMACIÓN

$$\text{Cov}\{\mathbf{e}\} = E\left\{(\bar{\mathbf{h}}_k - \hat{\mathbf{h}}_k)(\bar{\mathbf{h}}_k - \hat{\mathbf{h}}_k)^H\right\} - E\{\bar{\mathbf{h}}_k - \hat{\mathbf{h}}_k\}E\left\{(\bar{\mathbf{h}}_k - \hat{\mathbf{h}}_k)^H\right\}$$

$$\text{Cov}\{\mathbf{e}\} = \text{Cov}\{\bar{\mathbf{h}}_k\} - \tau P \text{Cov}\{\bar{\mathbf{h}}_k\} \Psi \text{Cov}\{\bar{\mathbf{h}}_k\}$$





# ERROR CUADRÁTICO MEDIO NORMALIZADO (NMSE) <sup>17</sup>

Es un KPI que permite comparar la calidad de los diferentes esquemas de estimación de canal en diferentes escenarios

$$\text{NMSE} = \frac{\text{tr}(\text{Cov}\{\mathbf{e}\})}{\text{tr}(\text{Cov}\{\bar{\mathbf{h}}_k\})}$$

$$\nu = \frac{\tau P}{\sigma_n^2}$$

relación señal a ruido (SNR) efectiva

**RICIAN**

$$\text{NMSE} = \frac{\text{tr}\left(\mathbf{R} - \nu \frac{\sigma_k^2}{\mathcal{K}_k + 1} \mathbf{R} \left(\nu \frac{\sigma_k^2}{\mathcal{K}_k + 1} \mathbf{R} + \mathbf{I}_M\right)^{-1} \mathbf{R}\right)}{\text{tr}(\mathbf{R})}$$

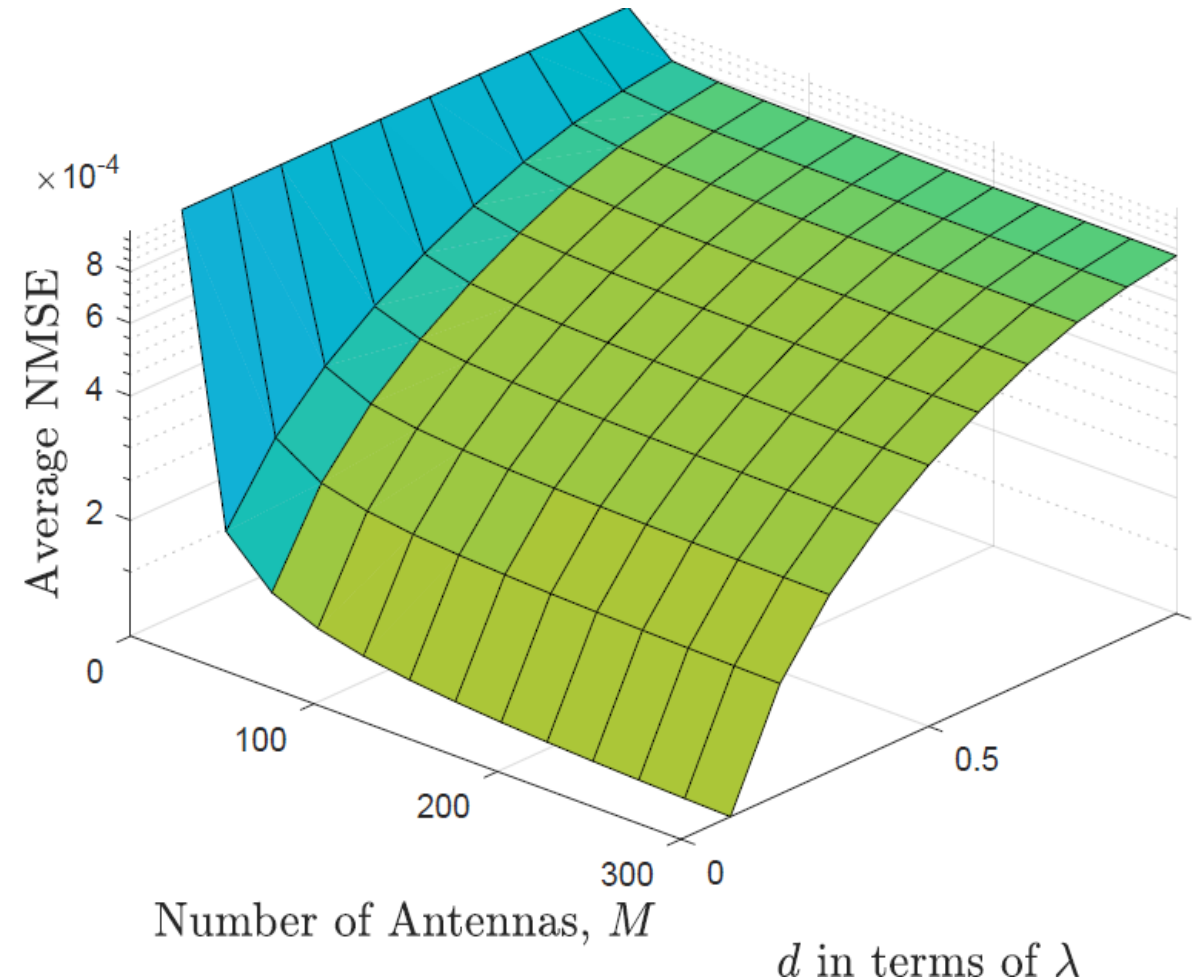
$$\mathcal{K}_k = \mathcal{K} \text{ y } \sigma_k^2 = 1/\sqrt{2}.$$



RAYLEIGH

$\mathcal{K}=0$

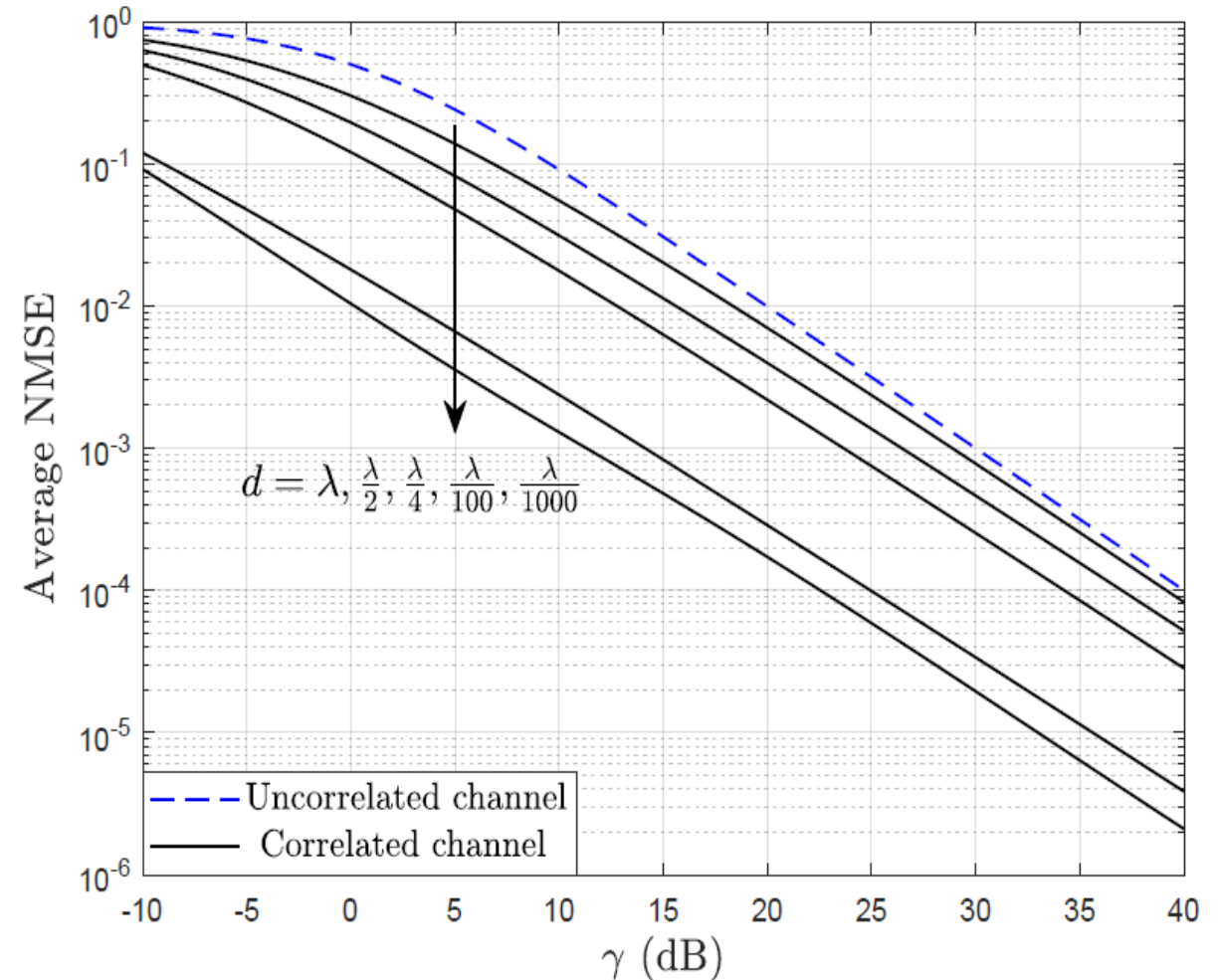
**R** con distribución angular Gaussiana, con un ángulo nominal  $\varphi = [-\pi, \pi]$ , intervalo angular con desviación estándar adecuado para ambientes urbanos  $\sigma_\varphi = 10^\circ$  y SNR efectiva de 30 dB



## RAYLEIGH

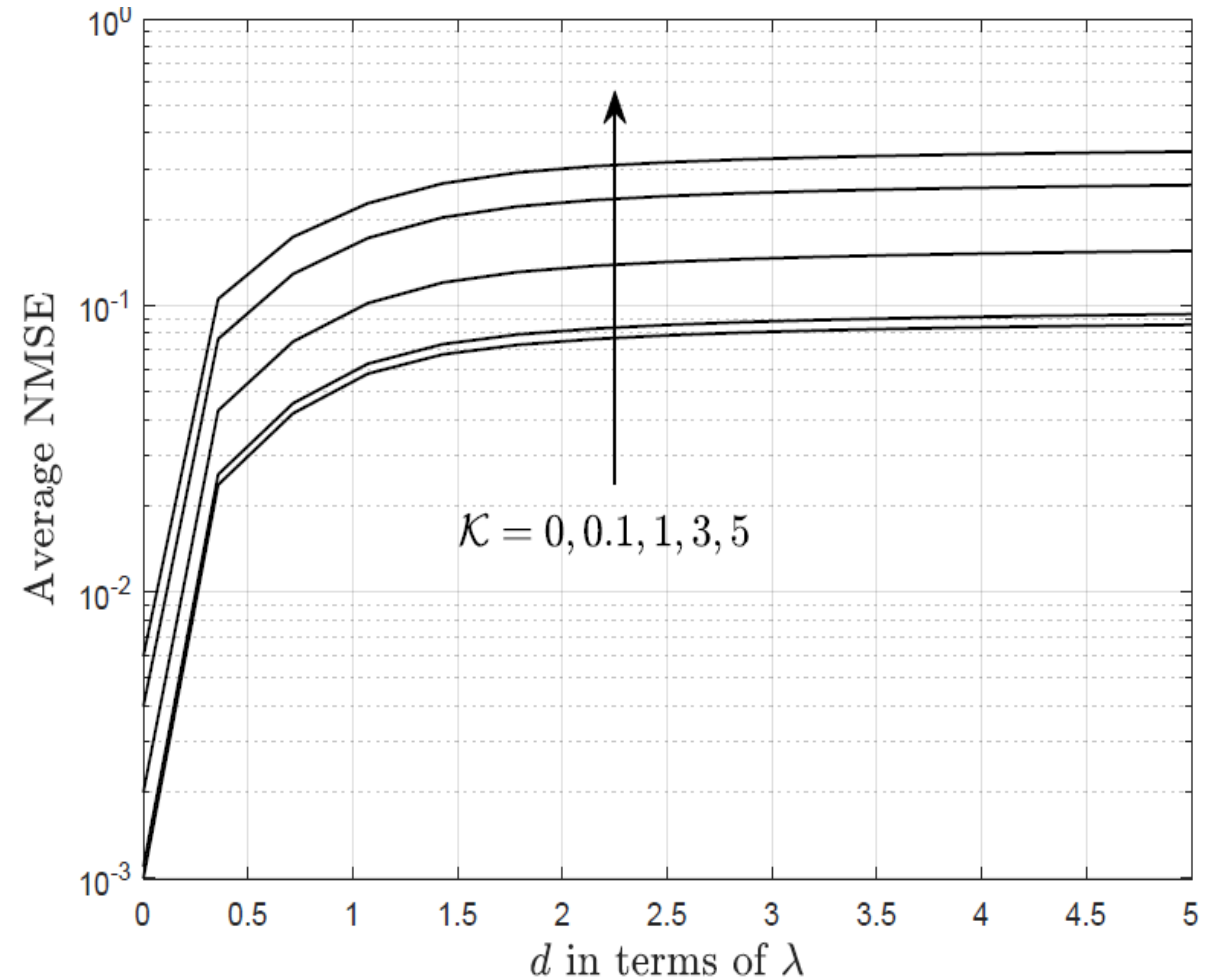
$$\mathcal{K}=0$$

**R** con distribución angular Gaussiana, con un ángulo nominal  $\varphi = [-\pi, \pi]$ , intervalo angular con desviación estándar adecuado para ambientes urbanos  $\sigma_\varphi = 10^\circ$  y número de antenas en la estación base (BS)  $M = 100$ .



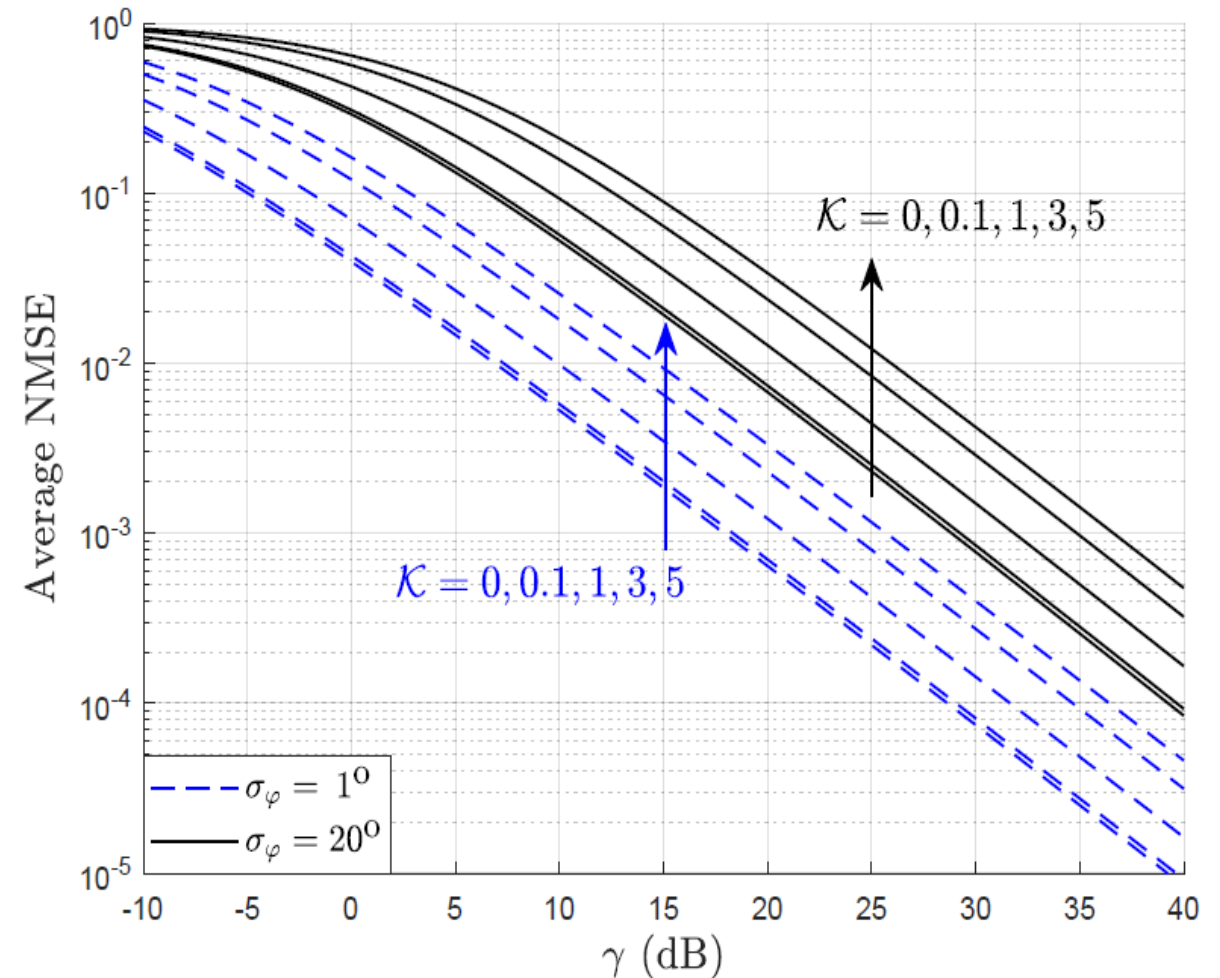
## RICIAN

**R** con distribución angular Gaussiana, con un ángulo nominal  $\varphi = [-\pi, \pi]$ , intervalo angular con desviación estándar adecuado para ambientes urbanos  $\sigma_\varphi = 10^\circ$ , SNR efectiva de 10 dB y número de antenas en la estación base (BS)  $M = 100$ .



## RICIAN

**R** con distribución angular Gaussiana, con un ángulo nominal  $\varphi = [-\pi, \pi]$ , separación entre antenas de la BS igual a  $\lambda/2$  y número de antenas en la estación base (BS)  $M = 100$ .



Cuando el factor de Rician tiende a infinito, las señales transmitidas llegan al receptor sólo por el componente LOS, es decir, llegan altos niveles de interferencia al receptor M-MIMO, que no pueden ser reducidos, independientemente del número de antenas en el arreglo de la BS.

A medida que aumenta la potencia del factor de Rician, también aumenta el NMSE promedio, siendo lo contrario cuando aumenta la correlación espacial o reduce la separación entre antenas en la BS. Asimismo, cuando existe un mayor número de antenas en la BS o una mayor SNR, se garantiza un NMSE promedio menor.

Con desvanecimiento de Rayleigh se obtuvieron mejores resultados del factor de reducción de interferencia y del error cuadrático medio normalizado.



# ***GRACIAS!***

***?***

***Contact:***

***Ing. Arellano Jorge***  
***[jfarellano@espe.edu.ec](mailto:jfarellano@espe.edu.ec)***