



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**SIMULACIÓN DEL EFECTO DE CONTAMINACIÓN
PILOTO PARA MIMO MASIVO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Electrónico

AUTOR: David Omar Chóez Gonzabay

Santiago Andrés Ostaiza Santiago

TUTOR: Verónica Emma Soria Maldonado

Quito-Ecuador

2022

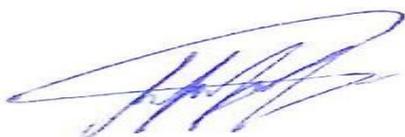
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, David Omar Chóez Gonzabay con documento de identificación N° 2400260929 y Santiago Andrés Ostaiza Suquillo con documento de identificación N° 1723244313; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 3 de mayo del año 2022

Atentamente,



David Omar Chóez Gonzabay
2400260929



Santiago Andrés Ostaiza Suquillo
1723244313

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, David Omar Chóez Gonzabay con documento de identificación No. 2400260929 y Santiago Andrés Ostaiza Suquillo con documento de identificación No. 1723244313, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico : “Simulación del efecto de contaminación piloto para MIMO Masivo”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana

Quito, 3 de mayo del año 2022

Atentamente,



David Omar Chóez Gonzabay
2400260929



Santiago Andrés Ostaiza Suquillo
1723244313

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Verónica Emma Soria Maldonado con documento de identificación N° 1715185961, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **SIMULACIÓN DEL EFECTO DE CONTAMINACIÓN PILOTO PARA MIMO MASIVO**, realizado por David Omar Chóez Gonzabay con documento de identificación N° 2400260929 y por Santiago Andrés Ostaiza Suquillo con documento de identificación N° 1723244313, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 3 de mayo del año 2022

Atentamente,



Ing. Verónica Emma Soria Maldonado, Mgtr.
1715185961

SIMULACIÓN DEL EFECTO DE CONTAMINACIÓN PILOTO PARA MIMO MASIVO

David Omar Chóez Gonzabay
Departamento de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
dchoezg@est.ups.edu.ec

Santiago Andrés Ostaiza Suquillo
Departamento de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
sostaizas@est.ups.edu.ec

Verónica Emma Soria Maldonado
Departamento de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
vsoria@ups.edu.ec

Resumen— Las redes inalámbricas han dado paso a una nueva evolución de infraestructuras de redes celulares más eficientes implementando tecnología 5G mediante MIMO MASIVO incorporando matrices de antenas con un dimensionamiento de espacio más reducido frente a grandes estructuras presentes en la actualidad, con la finalidad de brindar servicios de datos a un mayor número de dispositivos conectados a una estación base previo a la estimación del canal de comunicación mediante señales pilotos. Un incremento del número de antenas trae consigo una de las más grandes problemáticas conocida como la contaminación piloto producida a causa de la interferencia entre las señales de prioridad dentro de la celda principal y la de una celda vecina. Existen variedades de técnicas que se aplican para la eliminación de esta problemática sin embargo los resultados obtenidos colocan al esquema M-MMSE como el mejor estimador frente a otros detectores de interferencias, ya que analiza el comportamiento de la eficiencia espectral y el efecto para mitigar la interferencia producida por la contaminación piloto en las celdas adyacentes considerado un desvanecimiento correlacionado.

Palabras Clave— MIMO Masivo, M-MMSE, S-MMSE, TDD, eficiencia espectral, contaminación piloto.

Abstract— Wireless networks have given way to a new evolution of more efficient cellular network infrastructures, implementing 5G technology through MASSIVE MIMO, incorporating antenna arrays with a smaller space dimensioning compared to large structures present today, in order to provide services of data to a greater number of devices connected to a base station prior to estimating the communication channel by means of pilot signals. An increase in the number of antennas brings with it one of the biggest problems known as pilot contamination caused by interference between the priority signals within the main cell and that of a neighboring cell. There are varieties of techniques that are applied to eliminate this problem, however, the results obtained place the M-MMSE scheme as the most optimal estimator compared to other interference detectors, since it analyzes the

behavior of the spectral efficiency and the effect to minimize the interference caused by pilot contamination in adjacent cells considered a correlated fading.

Keywords— Massive MIMO, M-MMSE, S-MMSE, TDD, spectral efficiency, pilot contamination.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad las redes inalámbricas se han visto presionadas frente a la creciente demanda de dispositivos conectados a una estación base, esto a causa del avance tecnológico en la comunicación que requiere mayor velocidad de transmisión de datos a un gran número de usuarios, por lo que se abren las puertas hacia una nueva generación con tecnología 5G conocida como MIMO Masivo quien será protagonista del cambio evolutivo hacia un sistema de antenas a gran escala con acceso de múltiples entradas y múltiples salidas [1], considerando a la técnica TDD (Time Division Duplex) como a la más favorable en cuanto a la optimización de recursos ya que permite dentro de una misma frecuencia la estimación del canal por secuencias pilotos en un enlace uplink en intervalos de tiempos distintos en una trama que separa las señales enviadas y las recibidas [2]. Las investigaciones realizadas apuntan a MIMO Masivo como una nueva tecnología inalámbrica a implementarse en la comunicación cotidiana, creando cambios en la infraestructura y hardware utilizados, implementando arreglos de antenas con múltiples interfaces de radios en su interior que por medio de rayos directivos dirige la señal por el canal hacia el usuario solicitado, definiéndose Masivo no por su tamaño sino por la cantidad de radios que posee con el acceso a varios canales [3], lo que conlleva a otros beneficios como mejorar la eficiencia espectral, el consumo energético, el ancho de banda y una menor latencia, con una relación en la que el número de antenas debe ser mayor que el número de usuarios [4]. Uno de los retos que tiene MIMO Masivo es el uso de señales pilotos para la estimación del canal estableciendo la conexión entre el usuario y la estación base, sin embargo existe una limitación ante el uso de señales pilotos, ya que el número de pilotos al transmitirse es limitado, lo que produce la reutilización de los mismos en celdas adyacentes provocando interferencia entre las señales, a pesar de que la

potencia de la interferencia es baja en comparación a la de la señal prioritaria que se encuentra dentro de la celda principal produce una estimación errónea del canal y no se logra la detección de los datos del enlace ascendente, lo que lleva a una problemática conocida como contaminación piloto. [5] Con el pasar de los años se ha debatido como lidiar con la contaminación piloto, por lo que la mayoría de los investigadores han invertido su tiempo en desarrollar diferentes metodologías de descontaminación piloto. Existen variedades de enfoques clásicos de como mitigar dicho problema, relacionados al aumento del factor de reutilización de pilotos, a la estimación del canal asistido por datos y pilotos superimpuestos, todas estas técnicas tienen efectos similares pero que no son realmente la forma más optima de eliminar la interferencia. [6]

El presente artículo académico está orientado a la simulación del efecto contaminación piloto para MIMO Masivo, con un análisis del comportamiento dentro de las redes inalámbricas y la aplicación de la técnica de descontaminación piloto basado en la Eficiencia Espectral con Desvanecimiento Correlacionado aplicando el esquema de combinación y precodificación M-MMSE.

La organización del documento está dividida de la siguiente forma: la sección 2 indica las características principales de la tecnología MIMO Masivo y la contaminación piloto, la sección 3 plantea el escenario en que se trabajará analizando los resultados obtenidos de la simulación y finalmente la sección 4 muestra las conclusiones del artículo.

II. TECNOLOGÍA MIMO MASIVO

A. Rendimiento de Área

Una red es más eficiente cuando se habla de rendimiento de la cantidad de bits por segundo que se entrega a una red en su conjunto [$bits/s/Km^2$], para aumentar la eficiencia en una red se debe mirar un área con cierta cantidad de kilómetros cuadrados con cierto número de usuarios, y considerar la Densidad Celular (Cell Density) CD siendo el número de celdas por kilómetro cuadrado que se instaló en una región dado en [$celda/Km^2$], el Espectro Disponible (Available Spectrum) AS es el espectro de frecuencia disponible y se mide para heredar diferentes bandas de frecuencia en [Hz], la colección de ellos es lo que entra aquí, y la Eficiencia Espectral (Spectral Efficiency) SE es la que determina que tan eficiente es la tecnología. [7]

$$Rendimiento = CD * AS * SE \quad (1)$$

B. Eficiencia Espectral

Dentro de los requisitos a cumplir que se proponen para los futuros estándares de tecnología 5G se encuentra la de poder ofrecer una mayor Eficiencia Energética (Energy Efficiency) EE, debido a que al trabajar con múltiples antenas dentro de un entorno MIMO Masivo, se busca optimizar la energía que se consume al transmitir los datos

a múltiples usuarios [8].

$$EE = \frac{Rendimiento}{Consumo\ de\ energía} \quad (2)$$

La Eficiencia Espectral (Spectral Efficiency) SE, tiene un gran impacto en el rendimiento de las Estaciones Bases (Base Stations) BS, aprovechando las bandas de frecuencias para la transmisión de datos en los múltiples escenarios de MIMO Masivo, tomando en cuenta estos requisitos se establece la relación que existe entre las potencias implicadas, en donde se suma a la unidad la potencia de señal recibida, la potencia de interferencia más la potencia de ruido, en donde se emplea \log_2 obteniendo así una función de crecimiento lineal. Se plantea una fórmula denominada capacidad de Shannon (3) en unidades de [$bits/s/Hz/usuario$] siendo que si la relación es un logaritmo pequeño permite aumentar la potencia linealmente hasta alcanzar una eficiencia espectral considerable sin embargo esta a su vez irá creciendo muy lentamente al estar en una escala logarítmica. [9]

$$SE = \log_2 \left(1 + \frac{P. \text{señal recibida}}{P. \text{interf.} + P. \text{ruido}} \right) \quad (3)$$

C. Protocolo TDD

Con la Duplexación por División de Tiempo TDD (Time Division Duplex) se optimiza recursos de frecuencias, ya que con el uso de una misma frecuencia se realiza la estimación del estado del canal mediante señales pilotos en Uplink UL, por lo que la señal permite que la estación base aprenda el canal, lo que hace que el transmisor y el receptor se enlacen por medio de intervalos de tiempos sincronizados desde un inicio sin la necesidad de realizar la estimación Downlink DL, en una trama dividida en tres partes donde las señales pilotos ocupan la primera parte para la estimación del canal y el resto se utilice para la transmisión de los datos de enlace ascendente y descendente, dado que para establecer el tamaño de la trama se debe tener en cuenta dos factores fundamentales como el Tiempo de coherencia y el Ancho de banda de coherencia [10], por lo que el Tiempo de coherencia (Coherence Time) TC es cuánto tiempo se necesita para que un usuario se mueva antes de que el canal cambie [11], por otro lado el Ancho de banda de coherencia (Coherence Bandwidth) BC es algo revelador, en donde nace la interrogante de cuánto tiempo duran los retrasos desde el camino más corto al más largo que señalan desde el transmisor y el receptor, por lo que cuanto más largo sean esos retrasos, el ancho de banda de coherencia será más pequeño [12].

D. Señales Pilotos

En un entorno MIMO Masivo con redes multicelulares se busca dar servicio de conectividad a múltiples usuarios, por lo que se considera que cada estación base dentro de su celda respectiva estima el canal mediante señales pilotos en un

enlace ascendente, sin embargo al existir celdas adyacentes con diferentes usuarios, al momento de establecer el enlace, hace que la potencia de la señal deseada del equipo de usuario que se encuentra en la celda principal sea interrumpida por la potencia de la señal interferente de otro equipo de usuario de una celda vecina, que a pesar de ser de una menor potencia causa interferencia entre las dos señales, lo que hace que la estación base no pueda procesar ambas señales al mismo tiempo causando un error de lectura de la señal deseada, sin embargo los usuarios se están moviendo todo el tiempo por lo que se necesita estimar el canal con señales pilotos antes de que se mueva y cambie el canal, esto hace que el tiempo de coherencia del canal sea una limitante lo que conlleva a que los pilotos sean reutilizados en las diferentes celdas provocando la contaminación piloto [13].

E. Estimación del canal Uplink

Al considerar un escenario donde una estación base BS con M antenas establece comunicación con 2 equipos de usuarios UEs con reutilización de piloto, una vez sincronizados ambos terminales UE y BS mediante un protocolo TDD en fase de transmisión por pilotos en uplink ϕ^T se estima el canal h mediante una secuencia piloto de longitud τp con una potencia de señales pilotos normalizada ρ^{tr} y el ruido independiente normalizado N^p producido por el receptor, todos estos factores permiten que la señal recibida en uplink Y^p considere una apreciación de que efectos tienen en la estimación del canal. [14]

$$Y^p = \sqrt{\rho^{tr}} h_1 \phi^T + \sqrt{\rho^{tr}} h_2 \phi^T + N^p \quad (4)$$

Se realiza la estimación mediante el error cuadrático medio mínimo MMSE (Minimum Mean-Squared Error) para el canal denotado como h_k donde $k=1,2$ dependiendo del usuario a direccionarse, una vez Y^p realiza la estimación del canal al correlacionarse con las señales pilotos ϕ^* se considera $R_k Q^{-1}$ como la matriz de covarianza normalizada invertida multiplicada por la matriz de covarianza del canal propio del usuario [15].

$$\widehat{h}_k = \frac{1}{\sqrt{\rho^{tr}}} R_k Q^{-1} Y^p \phi^* \quad (5)$$

F. Transmisión de datos Uplink

Al transmitir los datos en uplink, la BS con M antenas, recibe una señal de banda base que consta de la señal portadora de la información que se transmite S_k por los distintos usuarios UE_k a una potencia normalizada ρ^{ul} por la cual se están propagando por diferentes canales a estas antenas, tomando en cuenta el ruido independiente n del receptor, luego en base a esta señal recibida, la BS extrae la señal del usuario uno y dos, estos al ser una especie de problemas simétricos, solo se centra en el análisis de uno, en este caso al UE_1 , por lo que se toma un vector de

combinación V_1 como detector lineal, donde la capacidad en uplink del UE_1 se encuentra limitada por [16].

$$SE_1^{ul} = \left(1 - \frac{Tp}{Tc}\right) \mathbb{E}\{\log_2(1 + \gamma_1^{ul})\} \quad (6)$$

Donde en (6) SE_1^{ul} es la eficiencia espectral del usuario 1 en uplink dada en [bits/s/Hz] con un γ_1^{ul} que es la relación entre la señal deseada, la interferente y el ruido efectivo instantáneo SINR dada por [17].

$$\gamma_1^{ul} = \frac{|v_1^H \widehat{h}_1|^2}{v_1^H (\widehat{h}_2 \widehat{h}_2^H + Z) v_1} \quad (7)$$

G. Transmisión de datos Downlink

La BS envía una señal portadora ζ_k con la información requerida al destinatario UE_k a una potencia de transmisión en downlink ρ^{dl} normalizada, en esta fase se utiliza un vector de precodificación W_k que está relacionado con UE_k , entonces la señal que se recibe Z_1 en UE_1 en downlink considerando el ruido que se produce en la detección de la señal está dada por [18]:

$$Z_1 = \sqrt{\rho^{dl}} h_1^H w_1 \zeta_1 + \sqrt{\rho^{dl}} h_1^H w_2 \zeta_2 + n_1 \quad (8)$$

Por lo que la capacidad del canal en downlink de UE_1 está determinada por:

$$SE_1^{dl} = \left(1 - \frac{Tp}{Tc}\right) \log_2(1 + \gamma_1^{dl}) \quad (9)$$

De igual manera en (9) se tiene SE_1^{dl} como la eficiencia espectral del usuario 1 en downlink dada en [bits/s/Hz] con un γ_1^{dl} que es la SINR efectiva, por lo que esta relación efectiva se da como [19]:

$$\gamma_1^{dl} = \frac{|\mathbb{E}\{h_1^H w_1\}|^2}{\mathbb{E}\{|h_1^H w_2|^2\} + \mathbb{V}\{h_1^H w_1\} + \frac{1}{\rho^{dl}}} \quad (10)$$

III. ESQUEMAS DE ESTIMACIÓN DEL CANAL

En una red de comunicación inalámbrica la estación base utiliza un estimador de canal para poder establecer un enlace con el equipo de usuario filtrando la señal recibida para deshacer cualquier tipo de ruido o interferencia en las celdas causada por la reutilización de pilotos, por lo que se emplea técnicas de estimación de canal S-MMSE para una sola celda y M-MMSE para múltiples celdas donde estos vectores de combinación o estimadores actúan como un filtro ante el ruido y la interferencia reduciendo la contaminación piloto y aumentando la eficiencia espectral en función del rango de antenas.

Esquema S-MMSE

El Error cuadrático medio mínimo de celda única S-MMSE (Single Cell- Minimum Mean Squared Error) es el esquema enfocado en utilizar las estimaciones del canal de los usuarios que se encuentran en una sola celda propia, a pesar de que este estimador tiene similitud con M-MMSE al emplear los mismos pilotos para la estimación de canales dentro y fuera de las celdas principales, S-MMSE no elimina la interferencia producida por otros usuarios generadas por celdas vecinas, por lo que frente a un sistema de red con múltiples usuarios la presencia de contaminación piloto sería muy grande [20].

Esquema M-MMSE

El esquema de combinación y precodificación Error Cuadrático Medio Mínimo Multicelda M-MMSE (Multicell-Minimum Mean Squared Error) es el encargado de hacer uso de las estimaciones de los diferentes canales de los usuarios que se encuentran en múltiples celdas evaluando la eficiencia espectral con desvanecimiento correlacionado es decir que se tiene una capacidad ilimitada de usuarios y celdas teniendo en cuenta que al momento de compartir pilotos con otros usuarios deben tener matrices de correlación linealmente independientes, lo que permite obtener una buena relación señal ruido y reducir la interferencia causada por la contaminación piloto [21].

IV. SIMULACIÓN DEL SISTEMA

Configuración de la simulación

Para la configuración del funcionamiento del sistema se utilizó el tipo de canal Rayleigh el cual permite evaluar el comportamiento de comunicación en una red celular introduciendo desvanecimientos entre las señales interferente y deseada. Se utiliza el software libre Matlab, el cual permite construir algoritmos, empleando fórmulas, cálculos matemáticos, funciones y representación de las gráficas a comparar. La estructura de los escenarios implementados se presenta en base a Tx y Rx, como se visualiza en la Figura 1.

Para la transmisión de datos se definió las variables para la configuración del escenario de redes celulares, donde se consideró un número de 4 celdas y por cada celda una estación base con 2 usuarios, para esto se estableció el rango de número de antenas en una escala logarítmica que va desde 10^1 hasta 10^3 con un factor de correlación de 0.5 el cual permite establecer la relación entre los canales de los usuarios deseados e interferentes que utilizan un mismo piloto, se usó un 1000 estimaciones de canales con el fin de obtener una mayor proximidad en la estimación del canal con una desviación estándar de cero lo que denota que las matrices son linealmente dependientes. En cuanto a los parámetros de propagación se estableció un ancho de banda de comunicación de 10^6 bps que es la cantidad de datos por segundos transmitidos a una potencia de transmisión de 100mW siendo esta la potencia emitida por un equipo

inalámbrico. De acuerdo con el protocolo TDD se usó el esquema de combinación S-MMSE donde la estación base realiza estimaciones de canales solo a los equipos de usuarios dentro la celda principal única y que gracias a la dualidad que posee este protocolo permitió estimar al mismo tiempo el canal en uplink como en downlink, midiendo la capacidad de transmisión en función de la eficiencia espectral a medida que aumenta el número de antenas, con la finalidad de mostrar gráficamente la diferencia entre la señal deseada de referencia por división de tiempo y la señal estimada por S-MMSE en presencia de la contaminación piloto, véase en la Figura 4. Finalmente se aplicó la técnica de precodificación y combinación M-MMSE la cual permitió que la estación base realice estimaciones de canales a los equipos de usuarios de todas las 4 celdas lo que provoca una mayor interferencia entre las celdas vecinas pero que al considerar un desvanecimiento correlacionado se logra mitigar el efecto de contaminación piloto la cual se asemeja a la señal referente deseada por división de tiempo, como se muestra en la Figura 5, todos los parámetros utilizados se pueden verificar en la Tabla 1.



Fig. 1 . Funcionamiento del Sistema

Estructura de los escenarios

A. Contaminación piloto

El primer escenario se construye en base a redes multicelulares, sin embargo se hace énfasis en la estimación del canal mediante la técnica S-MMSE lo que significa que de las cuatro celdas establecidas solo se estimará a los usuarios de una sola celda $L=1$ con 2 equipos de usuarios $K=2$ y una estación base BS con 200 antenas $M=200$, con esta configuración se busca demostrar que dentro de este pequeño esquema de red celular al reutilizar pilotos entre ambos usuarios UE_1 y UE_2 se produce el efecto de contaminación piloto, como se muestra en la Figura 2.

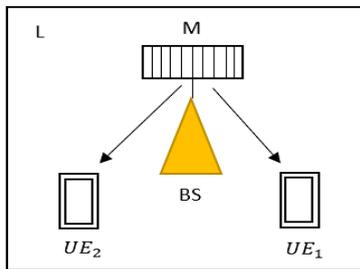


Fig. 2. Escenario MIMO Masivo con estimación S-MMSE

B. Descontaminación piloto

En el segundo escenario se tiene cuatro celdas $L=4$, en donde cada celda contiene una estación base BS que se encuentran ubicadas en las esquinas cubriendo todo el área con una separación entre ellas de 200m con $M=200$ antenas, consta de dos UEs equipos de usuarios $K=2$ ubicados en los bordes de cada celda, donde los UE_1 de color rojo comparten un piloto mientras que los UE_2 de color azul comparten otro piloto, esta variación de utilización de pilotos para los diferentes usuarios provoca mayor interferencia en relación al primer escenario pero en esta ocasión se emplea la técnica M-MMSE como estimador del canal para analizar el comportamiento de la eficiencia espectral con desvanecimiento correlacionado y el efecto para mitigar la interferencia producida por la contaminación piloto en las celdas adyacentes, véase en la Figura 3.

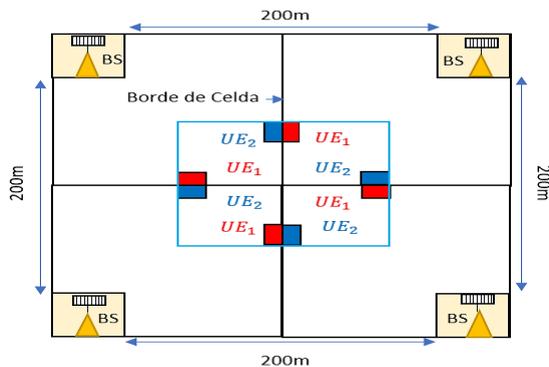


Fig. 3. Escenario MIMO Masivo con estimación M-MMSE

V. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para llevar a cabo el análisis se utiliza los parámetros de configuración presentados en la siguiente tabla:

L (Celdas)	4
K (Usuarios)	2
Rango de Antenas	$10^1 - 10^3$
Factor de correlación	0.5
Canal de Correlación	Rayleigh
Realizaciones	1000
Ancho de Banda	10^6 bps
Potencia de Transmisión	100mW
Protocolo	TDD
Estimador Celda Única	S-MMSE
Estimador Multicelda	M-MMSE

Tabla 1. Parámetros de configuración del sistema

La Figura 4 muestra la señal referente deseada por división de tiempo con un crecimiento ascendente en su eficiencia espectral reforzado con un factor M en un rango de 10^1 hasta 10^3 antenas, esto debido a que las 4 celdas están activas en diferentes bloques de coherencia pero no está exenta de la contaminación piloto es por eso que al estimar el canal con el esquema de combinación S-MMSE solo estima el canal de los usuarios de una celda única por lo que no tiene información de las otras celdas teniendo en cuenta que los pilotos son limitados esto hace que se reutilicen los pilotos en las otras celdas lo que provoca interferencia entre las celdas vecinas.

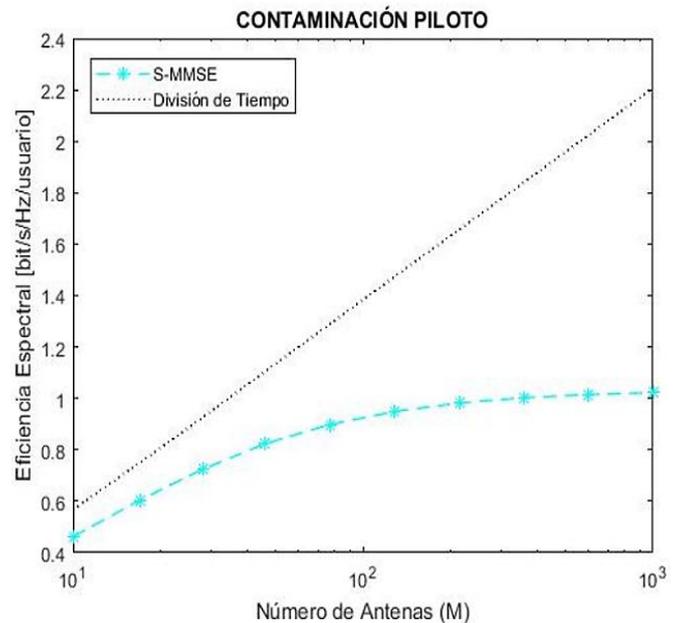


Fig. 4. Eficiencia Espectral vs Número de antenas piloto con S-MMSE

La Figura 5 indica que al utilizar el estimador M-MMSE considerando el rango de número de antenas en escala logarítmica para un valor de 10^2 antenas se tiene una eficiencia espectral de 1.25 [bits/s/Hz/usuario] mientras

que en S-MMSE la eficiencia espectral es de 0.95 [bits/s/Hz/usuario] presentando una mejora de un 32% la técnica M-MMSE debido principalmente a que este esquema utiliza las estimaciones de los canales de los usuarios en todas las celdas con un desvanecimiento correlacionado de Rayleigh con factor 0.5 la cual representa la correlación de canal espacial y variaciones de desvanecimiento a una gran escala sobre la matriz.

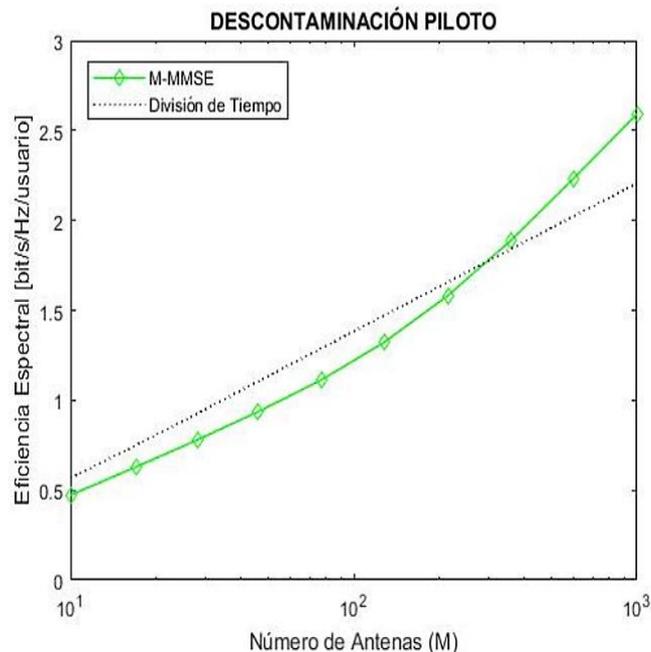


Fig. 5. Eficiencia Espectral vs Número de antenas con M-MMSE

La Figura 6 muestra la variación de las potencias recibidas sobre la potencia de ruido con los esquemas de combinación / precodificación S-MMSE y M-MMSE, donde se observa como la potencia de la señal deseada para ambos esquemas de detección oscila entre los 30 dB con una pequeña diferencia de 2dB entre las señales debido a que S-MMSE estima los canales de los usuarios en una celda única y en M-MMSE estima los canales de los usuarios en todas las 4 celdas, también se puede observar una fuerte interferencia con una potencia cercana a los 25dB a causa de que los usuarios utilizan los mismos pilotos y el esquema S-MMSE no mitiga dicha interferencia, ocurre lo contrario con M-MMSE ya que muestra una reducción de interferencia entre ambos esquemas de 10 dB aproximadamente, debido a que las estimaciones del canal contaminado por el piloto son linealmente independientes, lo que hace que se obtenga una mejor lectura en la transmisión de los pilotos, cuando los usuarios utilizan diferentes pilotos aquí ambos esquemas presentan casi la misma cantidad de potencia de señal interferente cerca de los 13dB y 12dB respectivamente, estos resultados indican que el estimador M-MMSE es el más eficiente para mitigar la contaminación piloto pero que a consecuencia de aquello existe una pequeña reducción de la potencia de la señal deseada.

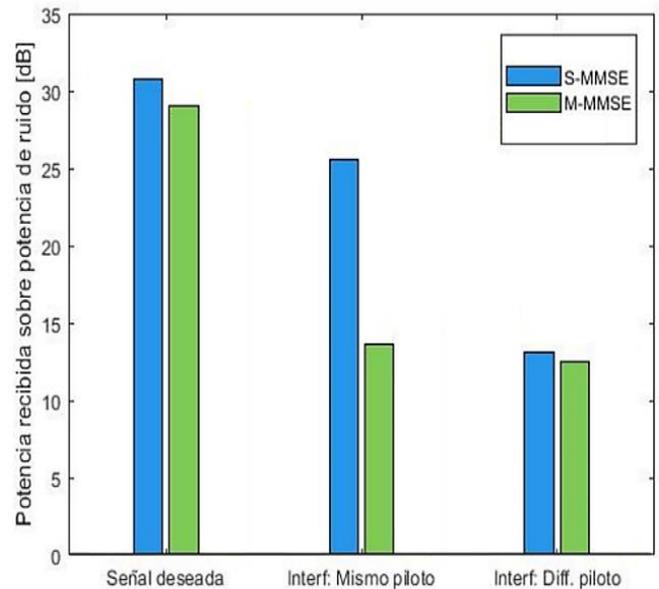


Fig. 6. Señal deseada e interferente en función de la Potencia recibida sobre la potencia de ruido

VI. CONCLUSIONES

En un entorno MIMO Masivo la capacidad de la eficiencia espectral no es limitada y se puede incrementar en función de la cantidad del número de antenas acopladas en las estaciones bases, que a consecuencia de este aumento de capacidad trae consigo la contaminación piloto por señales interferentes en celdas adyacentes la misma que se logra reducir al utilizar esquemas de combinación y precodificación de canales.

Aplicando la técnica M-MMSE fue posible aplicando en un escenario donde son linealmente independientes las matrices de covarianza al igual que los canales de usuarios que emplean los mismos pilotos, este esquema proporciona un mejor rendimiento de lectura de recepción de los datos de los usuarios aprovechando la dualidad uplink-downlink del protocolo TDD.

Se observa como el estimador S-MMSE obtiene una eficiencia espectral con un valor de 10^2 antenas en escala logarítmica de 0.95 [bits/s/Hz/usuario] y con M-MMSE se alcanza 1.25[bits/s/Hz/usuario] de eficiencia, lo que presenta una mejora de un 32% en eficiencia espectral al emplear el estimador de canal M-MMSE frente al S-MMSE, también se aprecia una diferencia en la potencia de recepción sobre la potencia de ruido de 2dB en la señal deseada entre ambos esquemas S-MMSE con 31dB y M-MMSE con 29dB debido a que el estimador M-MMSE al rechazar las interferencias provoca una reducción de potencia en la señal deseada.

La potencia de la señal interferente con usuarios que utilizaron los mismos pilotos la diferencia de potencia es de 10dB y con diferentes pilotos es de 1dB entre ambos estimadores, lo que demuestra que el esquema M-MMSE es óptimo en mitigar la contaminación piloto.

VII. REFERENCIAS

- [1] EG Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson y TL Marzetta, "Massive MIMO para sistemas inalámbricos de próxima generación", vol. 52, en IEEE Communications Magazine, 2014, pp. 186-195.
- [2] J. Nam, J. Ahn, A. Adhikary y G. Caire, "División y multiplexación espaciales conjuntas: Realización de ganancias MIMO masivas con información de estado de canal limitada", Conferencia Anual sobre Ciencias y Sistemas de Información, 2012, pp. 1-6.
- [3] E. Bjornson, J. Hoydis, L. Sanguinetti et al., "Redes mimo masivas: energía espectral y eficiencia de hardware", vol. 11, Foundations and TrendsR en el procesamiento de señales, 2017, pp. 154-655.
- [4] MY Ali, T. Hossain y MM Mowla, "A Trade-off between Energy and Spectral Efficiency in Massive MIMO 5G System", 3a Conferencia Internacional de Ingeniería Eléctrica, Informática y de Telecomunicaciones de (ICECTE), 2019.
- [5] TX Vu, TA Vu y TQS Quesk, "Eliminación de contaminación piloto sucesiva en redes multicelda de múltiples antenas", vol. 3, en IEEE Wireless Communications Letters, 2014, pp. 617-620.
- [6] Emil Bjornson, Jakob Hoyerdis and Luca Sanguinetti, "Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency", vol. 11, Foundations and TrendsR in Signal Processing, 2017, pp. 154-655.
- [7] Y. Gizlenmistir, "Massive MIMO en sistemas LTE: eficiencia energética y espectral", 26a Conferencia de aplicaciones de comunicaciones y procesamiento de señales (SIU), 2018, pp. 1-4.
- [8] D. Sarkar, Y. Antar y S. Mikki, "Control de la capacidad del canal de enlace ascendente MIMO masivo de ondas milimétricas y microondas mediante estructuras FSS reconfigurables", IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMARC), 2019, pp. 1-4.
- [9] Mihaela I Childean, E. Morgado, E del Arco, Julio Ramiro-Bargueño, Antonio J. Caamaño, "Scalable Data-Coupled Clustering for Large Scale WSN", vol. 14, IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, pp. 4681.
- [10] W. Li, J. Wu, C. Hsu y L. Wang, "Diseño de secuencia piloto de mínimos cuadrados para TDD Masive MIMO bajo desalineación de tiempo entre celdas", Simposio internacional anual de IEEE sobre comunicaciones de radio personales, interiores y móviles, 2018, pp. 5.
- [11] SE Hajri, M. Larrañaga, "Mejorando el MIMO masivo: un nuevo enfoque para la formación de enlaces escendentes basado en tiempos de coherencia heterogéneos", 25th International Conference on Telecommunications (ICT), 2018, pp. 361-366.
- [12] X. Jing, M. Li, H. Liu, S. Li y G. Pan, "Diseño de optimización piloto superpuesto y estimación de canales para sistemas MIMO masivos multiusuario", 25th International Conference on Telecommunications (ICT), 2018, pp. 361-366.
- [13] A. Khansefid y H. Minn, "Estimación de canales para MIMO masivo con contaminación piloto", vol. 19, en IEEE Communications Letters, 2015, pp. 1660-1663.
- [14] FAP de Figueiredo, FS Mathilde, FP Santos, FACM Cardoso y G. Fraidenraich, "Sobre estimación de canales para MIMO masivo con contaminación piloto y canales de desvanecimiento multitrayecto", 8th IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM), 2016, pp. 1-4.
- [15] S. Mandal y S. Guani, "Eficiencia energética de la estimación MMSE del sistema Massive MIMO de una sola celda y varias celdas", Conferencia internacional sobre tecnologías electrónicas de Nextgen: De silicio a software (ICNETS2), 2017, pp. 66-70.
- [16] F. Li. H. Wang, M. Ying, W. Zhang y J. Lu, "Estimaciones de canal basadas en pilotos superpuestos para sistemas de enlace ascendente MIMO masivos", 8th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2016, pp. 1-5.
- [17] N. Akbar, S. Yan, AM Khattak y N. Yang, "Sobre el ataque piloto de contaminación en redes MIMO masivas de múltiples usuarios y múltiples celdas", en IEEE Transactions on Communications, 2020, pp. 2264.
- [18] J. Shen, J. Zhang y KB Letaief, "Capacidad de usuario de enlace descendente de MIMO Masivo bajo contaminación piloto", vol. 14, en IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, pp. 3183-3193.
- [19] M. Wang y LM Davis, "Selección de usuarios distribuidos en sistemas MIMO masivo multicelulares con contaminación piloto", IEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall), 2015, pp. 1-5.
- [20] M. Kurras, L. Thiele y T. Haustein, "SDMA masiva consciente de interferencias con un gran conjunto de antenas rectangulares uniformes", Conferencia europea de redes y comunicaciones, 2014, pp. 1-5.
- [21] G. Yang, CK Ho, R. Zhang e YL Guan, "Optimización del rendimiento para sistemas MIMO masivos impulsados por transferencia de energía inalámbrica", vol. 33, en IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, pp. 1640-1650