

Jesús Abraham
Salinas Sánchez

Estudio del modelo de ruido
en PCC para la medición
de luminosidad en CMS

2026



Universidad Autónoma de
Querétaro

Facultad de Ingeniería

**Estudio del modelo de ruido en el
método de Pixel Cluster Counting
para la medición de la luminosidad en
CMS**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el
Grado de

Ingeniero Físico

Presenta

Jesús Abraham Salinas Sánchez

Dirigido por:

Dr. Alberto Hernández Almada

Co-Director:

Dr. José Feliciano Benítez Rubio

Querétaro, Qro. a mayo de 2026

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



**Universidad Autónoma de
Querétaro**
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Física

**Estudio del modelo de ruido en el método de Pixel
Cluster Counting para la medición de la
luminosidad en CMS**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de

Ingeniero Físico

Presenta

Jesús Abraham Salinas Sánchez

Dirigido por

Dr. Alberto Hernández Almada

Co-dirigido por

Dr. José Feliciano Benítez Rubio

Dr. Alberto Hernández Almada
Presidente

Firma

Dr. José Feliciano Benítez Rubio
Secretario

Firma

Dr. Adolfo Huet Soto
Vocal

Firma

Dr. Aldrin Melitón Cervantes
Contreras
Suplente

Firma

Dra. María Lucero Gómez Herrera
Suplente

Firma

Centro Universitario, Querétaro, Qro. México
Fecha de aprobación por el Consejo Universitario: junio de 2025

Dedicatorias: Al Dios Todopoderoso, por cuya infinita y Divina Providencia, los profesores, instituciones, amigos y familia con los que todo esto fue posible se cruzaron en mi camino. *Ad Maiorem Dei Gloriam.*

A Mamá y a Papá.

Agradecimientos

Este trabajo es solamente la última pieza que, junto a los profesores, instituciones, amigos y familia que Dios puso en mi vida, sus esfuerzos y apoyo, completan el rompecabezas que fue esta etapa de mi vida.

Primero, me gustaría agradecer a la Facultad de Ingeniería por haber sido mi recinto educativo durante estos 5 años, además de haberme brindado la oportunidad de cursar mi carrera bajo la enseñanza de un gran cuerpo docente y contar con el respaldo institucional que me permitió llevar a cabo este proyecto como alumno de esta institución. También le agradezco al Gobierno del Estado de Querétaro y a la Secretaría de Desarrollo Social del municipio de Querétaro por el apoyo económico brindado para este trabajo.

Luego, quiero agradecer a todos los profesores, amigos y familiares que, desde que comencé mi vida escolar hasta el día de hoy, se cruzaron en mi camino y creyeron en mí y en mi potencial en la física. Gracias a todos aquéllos que me impulsaron a seguir mis sueños tanto en la ciencia como en la vida, y nunca me cortaron las alas. En especial, al profesor Dr. Alberto Hernández Almada, quien me exhortó a seguir mis ambiciones académicas sin importar cuán descabelladas sonaran éstas, incluyendo esta tesis.

Del mismo modo, extiendo mi más sincero y profundo agradecimiento al Dr. José Feliciano Benítez Rubio, por haber creído en este proyecto por más inverosímil que hubiera parecido y haber sido pieza clave para su realización desde el principio. Además de toda su ayuda incondicional, al punto de ser mi padrino académico.

Después, obviamente sigue el agradecimiento a Papá y Mamá, esas personas que se dieron a la valiente tarea de mostrarme que traer una vida al mundo es la más viva expresión del amor de Dios que podemos experimentar los humanos. Verdaderamente les agradezco por ser un modelo de amor cristiano, y al igual que Dios se sacrificó por su siempre amada creación, ellos se sacrificaron por mi educación y mi desarrollo personal. Sirva esta entrega como un muy pequeño fruto y retorno de todos sus esfuerzos puestos en mi educación y bienestar. Este triunfo también es suyo.

Hablando de amor, agradezco a mi pareja, Guadalupe, por su amor, paciencia y compañía durante esta etapa. Gracias por sostenerme en los momentos de cansancio e incertidumbre, por escucharme, animarme y recordarme, incluso en los días más difíciles, por qué valía la pena llegar hasta aquí.

Por último y más importante, pido que Dios Todopoderoso, por cuya infinita bondad, amor y Providencia hizo posible que todas las piezas necesarias para completar este camino se reunieran hasta este momento, reciba este trabajo como ofrenda de agradecimiento por ser Él, por permitirme ser su hijo y por todas las bendiciones que me trajeron hasta aquí. Pues Él sin necesitar darme nada, me brinda todo lo que necesito.

¡Mamá, Papá! Soy Ingeniero Físico.

Resumen

La medición precisa de la luminosidad en colisionadores hadrónicos es esencial para cuantificar el rendimiento del acelerador, calibrar detectores y determinar con confiabilidad las probabilidades de producción de partículas en experimentos de física de altas energías. En CMS, uno de los métodos empleados para este propósito es Pixel Cluster Counting (PCC), el cual estima la luminosidad instantánea a partir del número promedio de cúmulos de píxeles registrados en el detector de silicio. Sin embargo, en condiciones reales de operación, esta medición se ve afectada por distintas contribuciones de ruido, principalmente pedestal, afterglow de tipo 1 y componentes exponenciales de tipo 2, descritas por los parámetros α , A y B , respectivamente.

El objetivo de este trabajo fue estudiar la dependencia temporal de dichos parámetros del modelo de ruido durante la toma de datos de CMS en 2022. Para ello, se modificó y reconstruyó un código de ajuste capaz de analizar rangos arbitrarios de BCIDs, calcular residuos y propagar incertidumbres. Posteriormente, se compararon distintas muestras de 60, 260, 480 y 940 BCIDs por bloque de 50 lumisections, con el fin de seleccionar la mejor combinación entre precisión estadística y costo computacional.

El análisis comparativo mostró que la configuración de 480 BCIDs constituye la muestra más eficiente, al ofrecer una mejora importante en la precisión sin un incremento desproporcionado en el tiempo de ejecución. Con esta selección se analizaron todos los fills de 2022 con el mismo patrón de llenado (1623). En una primera etapa, se aplicó una prueba de hipótesis basada en un ajuste a constante mediante χ^2 a las series temporales completas de α , A y B . Este análisis produjo valores de p compatibles con la hipótesis nula para los tres parámetros, por lo que, a escala anual global, el modelo resulta consistente con una descripción efectiva estacionaria.

No obstante, la inspección de las series temporales mostró una brecha asociada al paro técnico anual del LHC, después de la cual cambia el comportamiento de los parámetros. Por ello, se realizó un análisis complementario restringido al régimen pre-gap, en el que se compararon de forma explícita un modelo constante, $H_0 : y = b$, y un modelo lineal, $H_1 : y = mx + b$, sobre el mismo subconjunto de datos. La comparación formal entre modelos anidados se realizó mediante $\Delta\chi^2$. En este régimen, el parámetro α no mostró una mejora estadísticamente significativa al introducir una pendiente libre, con $p_{\text{final}} = 0,702$, mientras que para A y B el modelo lineal mejoró significativamente al constante, con $p_{\text{final}} = 3,903 \times 10^{-35}$ y $2,102 \times 10^{-12}$, respectivamente.

En consecuencia, los resultados indican que α puede tratarse como constante tanto a escala anual global como dentro del régimen pre-gap, pero que los parámetros asociados al ruido de tipo 2 exhiben deriva temporal lineal mientras las condiciones operativas del LHC permanecen esencialmente inalteradas. Así, el modelo de ruido empleado en PCC resulta adecuado como descripción efectiva global del año, pero no completamente estático cuando se estudian periodos homogéneos de operación con mayor detalle.

Palabras clave: luminosidad, CMS, Pixel Cluster Counting, afterglow, modelo de ruido, deriva temporal.

Abstract

Precise luminosity measurement in hadron colliders is essential for quantifying accelerator performance, calibrating detectors, and reliably determining particle production probabilities in high-energy physics experiments. In CMS, one of the methods used for this purpose is Pixel Cluster Counting (PCC), which estimates instantaneous luminosity from the average number of pixel clusters recorded in the silicon detector. Under real operating conditions, however, this measurement is affected by several noise contributions, mainly pedestal, type-1 afterglow, and type-2 exponential components, described by the parameters α , A , and B .

The aim of this work was to study the time dependence of these noise-model parameters during CMS data taking in 2022. To address this, an existing fitting code was modified and rebuilt so that it could analyze arbitrary BCID ranges, calculate residuals, and propagate uncertainties. Different data samples containing 60, 260, 480, and 940 BCIDs per block of 50 lumisections were then compared in order to identify the best balance between statistical precision and computational cost.

The comparative analysis showed that 480 BCIDs provide the most efficient sample, yielding a significant gain in precision without a disproportionate increase in execution time. Using this selection, all 2022 fills with the same filling pattern (1623) were analyzed. In a first stage, a hypothesis test based on a constant fit using χ^2 was applied to the full-year time series of α , A , and B . This analysis produced p -values consistent with the null hypothesis for all three parameters, indicating that, on a global annual scale, the model is compatible with an effectively stationary description.

However, the time series exhibit a visible gap associated with the annual LHC technical stop, after which the behavior of the parameters changes. For this reason, a complementary analysis was performed using only the pre-gap subset. In this regime, a constant model, $H_0 : y = b$, and a linear model, $H_1 : y = mx + b$, were fitted to the same data, and the formal comparison between both nested models was carried out through $\Delta\chi^2$. For α , introducing a free slope did not produce a statistically significant improvement, with $p_{\text{final}} = 0,702$. In contrast, for A and B the linear model improved significantly over the constant one, with $p_{\text{final}} = 3,903 \times 10^{-35}$ and $2,102 \times 10^{-12}$, respectively.

Therefore, the results indicate that α can be treated as time-independent both on a global annual scale and within the pre-gap regime, whereas the parameters associated with type-2 noise display linear temporal drift as long as the LHC operating conditions remain essentially unchanged. Thus, the noise model used in PCC is adequate as a global effective description of the full year, but it is not fully static when homogeneous operating periods are studied in greater detail.

Keywords: luminosity, CMS, Pixel Cluster Counting, afterglow, noise model, temporal drift.

Índice general

Índice de cuadros

Índice de figuras

1	Introducción	2
I	Antecedentes y Marco teórico	4
a	CERN y LHC	5
b	Conceptos de aceleradores	7
c	Unidades	8
d	Magnitudes características de un acelerador	8
e	Luminosidad integrada	10
II	Hipótesis y Objetivos	10
a	Planteamiento de la hipótesis	10
2	CMS	13
I	Imán y yugo de acero	14
II	Calorímetros: ECAL y HCAL	14
a	ECAL	14
b	HCAL	14
III	Sistema de muones	15
IV	Sistema de rastreo (<i>Tracker</i>)	15
a	Visión general del tracker de silicio	15
b	Rastreador de tiras de silicio (Silicon Strip Tracker)	16
c	Detector de píxeles (PD)	18
d	Proceso de selección de cúmulos/clusters	19
3	Metodología	21
I	Pixel Cluster Counting: PCC	21
II	Método de Calibración de van der Meer (vdM scan)	22
a	Fundamento teórico	23
III	Modelado y supresión de ruido	24
IV	Estudio de la dependencia temporal de los parámetros del modelo de α , A y B	25

4	Resultados y discusión	30
I	Ajustes y selección de muestra	30
a	Ajuste de un solo BCID	30
b	Ajuste con N BCIDs	32
c	Evolución temporal	41
d	Análisis de precisión vs. eficiencia.	47
II	Análisis de todo el año	49
a	Tipo 1: fracción (α)	49
b	Tipo 2: norma (A)	50
c	Tipo 2: constante de tiempo (B)	50
d	Primera prueba de hipótesis: ajuste a constante en la serie anual completa	52
e	Análisis complementario: comparación entre un modelo constante y un modelo lineal en el régimen pre-gap	53
5	Conclusiones	57
6	Apéndice	61
a	Códigos	61
b	Tiempo de ejecución de los ajustes	61
	Bibliografía	63

Índice de cuadros

2.1	Número de módulos por capa o disco del PD.	20
4.1	Cuadro comparativo del número de BCIDs utilizados en el ajuste vs. la estimación promedio, error promedio absoluto y el error porcentual promedio producido para un ajuste con ese número de BCIDs para el parámetro α	47
4.2	Cuadro comparativo del número de BCIDs utilizados en el ajuste vs. la estimación promedio, error promedio absoluto y el error porcentual promedio producido para un ajuste con ese número de BCIDs para el parámetro A	47
4.3	Cuadro comparativo del número de BCIDs utilizados en el ajuste vs. la estimación promedio, error promedio absoluto y el error porcentual promedio producido para un ajuste con ese número de BCIDs para el parámetro B	48
4.4	Resultados del ajuste del parámetro de ruido α para todos los primeros 480 BCIDs de cada bloque de 50 lumisections con el mismo patrón de llenado (1623) de todos los fills del año 2022.	49
4.5	Resultados del ajuste del parámetro de ruido A para todos los primeros 480 BCIDs de cada bloque de 50 lumisections con el mismo patrón de llenado (1623) de todos los fills del año 2022.	50
4.6	Resultados del ajuste del parámetro de ruido B para todos los primeros 480 BCIDs de cada bloque de 50 lumisections con el mismo patrón de llenado (1623) de todos los fills del año 2022.	50
4.7	Resultados de la primera prueba de hipótesis, basada en el ajuste a constante de la serie anual completa. El p -valor se calcula con respecto a la hipótesis nula descrita en la subsección a. Planteamiento de la hipótesis.	52
4.8	Resultados del análisis complementario en el régimen pre-gap. Para cada parámetro se reportan los ajustes bajo $H_0 : y = b$ y $H_1 : y = mx + b$, así como sus respectivos χ^2 , grados de libertad y la comparación formal entre ambos modelos mediante $\Delta\chi^2$ y p_{final}	54
6.1	Cuadro comparativo del número de BCIDs utilizados en el ajuste vs. el tiempo de ejecución necesario en minutos para un ajuste con ese número de BCIDs.	62

Índice de figuras

1.1	Diagrama de una colisión entre dos paquetes de un haz.	9
2.1	Corte coronal de las diferentes capas de CMS y en cuáles se detecta qué tipo de partícula.	13
2.2	Vistas laterales y frontales del sistema de rastreo de CMS y sus diferentes capas.	16
2.3	Descripciones gráficas de los módulos de detección de tiras de silicio del rastreador de tiras de silicio en CMS.	16
2.4	Descripciones gráficas de los módulos de detección de píxeles de silicio en PD como parte del sistema de rastreo de CMS.	18
3.1	A la izquierda: escaneo de los haces con diferentes separaciones de $(\pm 3\Delta_x$ y $\pm 3\Delta_y)$ en el plano transversal, horizontalmente se muestra el escaneo en el eje x y, verticalmente, en el eje y. A la derecha: distribución de R_x o R_y en función de la separación de los haces, donde se ve que Σ_x y su análogo Σ_y están relacionados con anchos de la distribución.	23
4.1	Ajuste de un solo BCID de la corrida 362154 de CMS para corroborar el funcionamiento del código de ajuste y cálculo de residuos.	31
4.2	Residuos del ajuste de un solo BCID de la corrida 362154 de CMS para corroborar el funcionamiento del código de ajuste y cálculo de residuos.	32
4.3	Ejemplo representativo del ajuste del modelo de ruido de PCC para la muestra de 60 BCIDs en la corrida 362154 de CMS.	33
4.4	Residuos correspondientes al ejemplo representativo del ajuste del modelo de ruido de PCC para la muestra de 60 BCIDs en la corrida 362154 de CMS.	34
4.5	Ejemplo representativo del ajuste del modelo de ruido de PCC para la muestra de 260 BCIDs en la corrida 362154 de CMS.	35
4.6	Residuos correspondientes al ejemplo representativo del ajuste del modelo de ruido de PCC para la muestra de 260 BCIDs en la corrida 362154 de CMS.	36
4.7	Ejemplo representativo del ajuste del modelo de ruido de PCC para la muestra de 480 BCIDs en la corrida 362154 de CMS.	37

4.8	Residuos correspondientes al ejemplo representativo del ajuste del modelo de ruido de PCC para la muestra de 480 BCIDs en la corrida 362154 de CMS.	38
4.9	Ejemplo representativo del ajuste del modelo de ruido de PCC para la muestra de 940 BCIDs en la corrida 362154 de CMS.	39
4.10	Residuos correspondientes al ejemplo representativo del ajuste del modelo de ruido de PCC para la muestra de 940 BCIDs en la corrida 362154 de CMS.	40
4.11	Evolución temporal del parámetro α para distintas configuraciones de BCIDs por bloque de 50 lumisections en la corrida 362154 de CMS: (a) 60 BCIDs, (b) 260 BCIDs, (c) 480 BCIDs y (d) 940 BCIDs.	42
4.12	Evolución temporal del parámetro A para distintas configuraciones de BCIDs por bloque de 50 lumisections en la corrida 362154 de CMS: (a) 60 BCIDs, (b) 260 BCIDs, (c) 480 BCIDs y (d) 940 BCIDs.	44
4.13	Evolución temporal del parámetro B para distintas configuraciones de BCIDs por bloque de 50 lumisections en la corrida 362154 de CMS: (a) 60 BCIDs, (b) 260 BCIDs, (c) 480 BCIDs y (d) 940 BCIDs.	46
4.14	Gráficas de los resultados del análisis comparativo entre precisión y costo computacional realizado y descrito en IV. Selección de una muestra. . .	48
4.15	Evolución temporal del parámetro de ruido α vs. tiempo en unidades de bloques de 50 lumisections, para todo el año 2022.	49
4.16	Evolución temporal del parámetro de ruido A vs. tiempo en unidades de bloques de 50 lumisections, para todo el año 2022.	50
4.17	Evolución temporal del parámetro de ruido B vs. tiempo en unidades de bloques de 50 lumisections, para todo el año 2022.	51
4.18	Comparación entre un ajuste a constante ($H_0 : y = b$) y un ajuste lineal ($H_1 : y = mx + b$) para el parámetro α en el régimen pre-gap.	54
4.19	Comparación entre un ajuste a constante ($H_0 : y = b$) y un ajuste lineal ($H_1 : y = mx + b$) para el parámetro A en el régimen pre-gap.	55
4.20	Comparación entre un ajuste a constante ($H_0 : y = b$) y un ajuste lineal ($H_1 : y = mx + b$) para el parámetro B en el régimen pre-gap.	55

Capítulo 1

Introducción

Un colisionador de partículas tiene como principal objetivo producir éstas en números del orden de los trillones cada segundo durante su funcionamiento, el cual consiste en acelerar haces de partículas y hacerlos colisionar entre sí. En este contexto, saber con precisión cuántas partículas se producen por unidad de área y por unidad de tiempo es sumamente importante para medir el rendimiento de un colisionador. Esta magnitud se conoce como *luminosidad instantánea* y permite determinar las probabilidades de producción de distintos procesos en los experimentos, monitorear la estabilidad del acelerador y calibrar los detectores con los que se registran las colisiones. A partir de ella se define la *luminosidad integrada*, que se obtiene al integrar la luminosidad instantánea en el tiempo y cuantifica la exposición total acumulada durante un periodo de toma de datos.

Para medir la luminosidad instantánea, los físicos de partículas y de aceleradores usan luminómetros, que son el conjunto de instrumentos y algoritmos con los que se recaba y se filtra la información necesaria para calcularla, además de realizar los cálculos correspondientes para la determinación de la luminosidad integrada. Para lograr todos los beneficios que ofrece una medición de buena calidad de la luminosidad instantánea o luminosidad, sólo por ahora, mencionados al principio, los físicos buscan que cualquier luminómetro que utilicen cumpla con tres características: ser lineal con respecto a la luminosidad, ser estable en el tiempo y tener suficiente significancia estadística en sus mediciones. Tal es el caso de los siete luminómetros que emplea el grupo de investigación de Radiación de Haces, Instrumentación y Luminosidad (BRIL por sus siglas en inglés), encargado de la instrumentación, calibración y control de radiación del Solenoide Compacto de Muones o *Compact Muon Solenoid* (CMS) en inglés, que, junto a ALICE, ATLAS, y LHCb ¹, es uno de los cuatro experimentos principales del colisionador de partículas más grande del mundo, el Gran Colisionador de Hadrones o *Large Hadron Collider* (LHC), también en inglés. En especial, el método de *Pixel Cluster Counting* (PCC) o Conteo de Cúmulos de Píxeles, el cual combina los sensores ubicados en el centro del detector del experimento, junto a un conteo estadístico de cuántos de éstos

¹Ver 5. Abreviaturas y siglas.

se activan en promedio. Así se explota la proporcionalidad directa que existe entre el número de grupos (cúmulos o clústers) de sensores de píxeles de silicio y la luminosidad instantánea y, como se seleccionan los cúmulos de sensores que miden mayor cantidad de activaciones y permanecen constantes en el tiempo, se obtiene un luminómetro que cumple las tres características ya dichas. Así pues, en PCC, la luminosidad instantánea se obtiene como ²[1]:

$$\mathcal{L}_{inst} = \frac{\langle N_{clusters} \rangle \nu}{\sigma_{vis}}, \quad (1.1)$$

Donde $\langle N_{clusters} \rangle$ es el número promedio de cúmulos que se activa durante cada muestreo de la medición, ν es la frecuencia con la que un cúmulo completa una vuelta alrededor del colisionador y σ_{vis} es la probabilidad medida u observada de que dos partículas, yendo en sentido contrario, colisionen.

En su forma ideal, PCC asume que, tras una selección adecuada de módulos (grupos de cúmulos) y teniendo el ruido constante que produce la electrónica (pedestal), la relación entre el conteo de cúmulos activados por las colisiones de partículas y su promedio es estable en el tiempo. Sin embargo, en condiciones reales intervienen diferentes fenómenos que inducen ruido a las mediciones y pueden sesgar este conteo. De manera cualitativa, estos fenómenos pueden distinguirse como [2]: (i) un pedestal o contribución de base; (ii) un derrame (*spill-over* en inglés) o remanente de partículas que se produce inmediatamente después de la colisión, que aquí referimos como componente tipo 1f o fracción, del inglés *type 1 fraction*; y (iii) el tipo 2; una cola exponencial que se extiende a varias colisiones sucesivas, asociada a procesos de activación y trampas en el material, cuyos parámetros asociados son A, la amplitud del decaimiento exponencial y B, su constante de tiempo. En consecuencia, tener un conocimiento atinado y profundo del comportamiento de cada contribución de ruido permite obtener mejores selecciones de módulos y, por consiguiente, mejores conteos de cúmulos, lo que resulta en poder obtener mejores mediciones de la luminosidad con PCC en CMS.

Para el año 2022, el modelo matemático utilizado para ajustar y sustraer las diferentes contribuciones de ruido consideró a sus parámetros asociados; para efectos de este trabajo, α , A y B , respectivamente; como estáticos durante el periodo de toma de datos [3]. Año para el cual, CMS reportó un valor de luminosidad integrada de 41.5fb^{-1} con una incertidumbre relativa total de 1.4%, la medición más precisa en la historia de la colaboración. No obstante, como la energía con la que se llevan a cabo las colisiones también es la más alta en la historia de los colisionadores de partículas, además de que se avecina una época de renovación de éstos y lanzamiento de nuevos proyectos para realizar experimentos a energías más altas, surgen las siguientes preguntas: ¿las contribuciones de los diferentes tipos de ruido en el conteo de cúmulos realmente son estáticas?, ¿surgirán nuevos efectos físicos que interferirán en las mediciones de luminosidad en CMS? y ¿las condiciones de operación a esas energías harán que el

²Ver I. Pixel Cluster Counting: PCC.

envejecimiento de los detectores ahora sí sea relevante en las mediciones de luminosidad?

Es por ello que, como un primer intento de responder estas preguntas con los datos disponibles, antes de que se construyan nuevos colisionadores y se renueven los existentes, en este trabajo se utilizaron datos de conteo de cúmulos obtenidos por CMS en el año 2022 para efectuar un análisis estadístico sobre la posible deriva temporal de las contribuciones de ruido en PCC.

El análisis consistió en usar los datos tomados durante 2022 con el detector ya calibrado según lo visto en la sección II del tercer capítulo ³ y propiamente discriminados como se explica en la subsección d de la sección IV del segundo capítulo ⁴ para realizar múltiples ajustes de los datos al modelo matemático de las contribuciones de ruido de 2022 ⁵ y así obtener estimaciones de los parámetros $\{\alpha, A, B\}$ a lo largo del año. A partir de estas estimaciones se aplicaron dos pruebas complementarias. En primer lugar, se realizó una prueba de hipótesis basada en un ajuste a constante sobre la serie temporal completa de 2022, con el fin de evaluar si los parámetros podían describirse de manera efectiva como estacionarios a escala anual global. En segundo lugar, al identificarse una brecha asociada al paro técnico anual del LHC, se efectuó un ajuste lineal restringido al periodo previo a dicha brecha para estudiar si, bajo condiciones operativas más homogéneas, emergía alguna deriva sistemática.

Finalmente, los resultados mostraron que, al considerar el conjunto completo del año, las series temporales de α , A y B son compatibles con una descripción efectiva constante. Sin embargo, al restringir el análisis al régimen previo al paro técnico anual, se encontró que α permanece compatible con ausencia de deriva temporal, mientras que A y B presentan una deriva lineal creciente estadísticamente significativa. En consecuencia, el modelo de ruido utilizado en PCC resulta adecuado como descripción efectiva global de 2022, pero no completamente estático cuando se estudian periodos homogéneos de operación con mayor resolución temporal.

I. Antecedentes y Marco teórico

La medición de la luminosidad en colisionadores hadrónicos⁶ ha sido central desde el Súper Sincrotrón de Protón-Antiprotón (Spp̄S), el colisionador previo al LHC, y Tevatron, el mayor colisionador estadounidense activo hasta el 2011, con incertidumbres históricamente de varios por ciento dominadas por conocimiento geométrico de haces y luminómetros simples [4, 5]; pero con el LHC y CMS, múltiples luminómetros y campañas sistemáticas de calibración han reducido la incertidumbre global al rango

³Ver II. Método de Calibración de van der Meer (vdM scan).

⁴Ver d. Proceso de selección de cúmulos/clusters.

⁵Ver III. Modelado y supresión de ruido.

⁶Los hadrones son partículas hechas de quarks o antiquarks.

de $\sim 1\text{--}2\%$ [6, 7, 8, 9]. En CMS, el grupo BRIL opera 7 sistemas complementarios, entre ellos PCC, cada uno con sensibilidad distinta a fuentes de ruido como radiación post-colisión, envejecimiento y variaciones operativas [10, 11, 12, 13]. Así pues, de forma relevante para esta tesis, las notas de CMS documentan que las correcciones hechas al conteo de cúmulos que se obtienen para calcular la luminosidad con PCC se miden y se aplican considerando cierta deriva temporal desde un punto estadístico más que de uno fenomenológico [2, 3, 14, 15]. En particular, para PCC en 2017 se reportan correcciones típicas para α de $\sim 2\text{--}5\%$ y para $\{A, B\}$ de $\sim 2\text{--}3\%$, y en 2018 de $\sim 2\text{--}3\%$ para α con corrección total de $\sim 6\text{--}7\%$ [2, 14]; en 2022 se definió nuevamente el esquema para $\{\alpha, A, B\}$ y se aplicaron correcciones dependientes de la luminosidad de un solo grupo de partículas al colisionar y de la posición de éstas en el orden de colisión, evaluando además estabilidad en ventanas de ~ 1000 segundos [3]. En este contexto, PCC se ve grandemente beneficiado por cualquier mejora que se haga a la instrumentación o al conteo de cúmulos, pero permanece sujeto a las contribuciones convencionales de ruido [6, 16, 17] con deriva temporal residual que se han visto hasta este punto; de ahí el interés en caracterizar sistemáticamente la variación temporal de parámetros del modelo de ruido (p. ej., $\{\alpha, A, B\}$), su propagación a la estabilidad de la luminosidad instantánea $\mathcal{L}_{\text{inst}}$ y, en última instancia, a la sección eficaz visible σ_{vis} calibrada con [1, 4, 9, 18].

a. CERN y LHC

CERN

Después de la segunda guerra mundial, dos hechos cambiaron el rumbo de la ciencia moderna: la Big Science estadounidense había superado por mucho a la ciencia europea, y la física nuclear se volvió fundamental en el papel de la región en la Guerra Fría.

En respuesta a ello, en 1954 se creó el *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*, CERN. Así pues, desde 1954 en Ginebra, Suiza, el CERN desarrolló diferentes instalaciones para fomentar diversos temas de investigación física atómica y subatómica [19]. El CERN, como su nombre lo indica, está compuesto del Consejo, formado por 24 países europeos que aportan significativamente al capital del CERN, tienen acceso total a sus instalaciones y proyectos, y a la toma de decisiones. Luego están los países asociados como Brasil o Ucrania, difiriendo en cuáles aspectos pueden decidir. Luego están los estados observadores, como Estados Unidos, los cuales han aportado significativamente al capital de CERN y tienen derecho de acceso y uso total, pero no pueden decidir en ningún aspecto en el Consejo. Por último, están los países no-miembros, como México, que pueden participar en la medida acordada en los acuerdos de cooperación entre CERN y el estado correspondiente [20].

Además de su diversidad étnica y de financiamiento, el CERN cuenta con una variedad abismal de experimentos relacionados a entender la física de altas energías, la física subatómica y todo lo que les acaece. Entre ellos están [21]:

- Experimentos relacionados con antimateria.

- Experimentos relacionados con la búsqueda de materia oscura.
- Experimentos relacionados al desarrollo de tecnologías de la información.
- Experimentos relacionados al desarrollo de tecnologías de aceleradores.
- Complejo de aceleradores.

El complejo de aceleradores está compuesto por [21, 22, 23, 24, 25]:

- 4 aceleradores lineales: linac 1 $\sqrt{s} = 50MeV$ (descontinuado 1978) ,2 $\sqrt{s} = 50MeV$ (descontinuado en 2018),3 (ioniza plomo para el LHC),4 $\sqrt{s} = 160MeV$ (es el punto de entrada de los protones al LHC).
- 6 sincrotrones: LHC,SPS,PS, LEIR, PSB, AD

La ruta de un haz de protones para colisiones es [21, 25]:

- Linac 4 (160MeV)
- Proton Synchrotron Booster, PSB, (2GeV)
- Proton Synchrotron, PS, (26 GeV)
- Super Proton Synchrotron, SPS, (450 GeV)
- Large Hadron Collider, LHC, (13.6 TeV)

Los iones de plomo (Pb^+) requieren dos pasos adicionales, antes de incorporarse al circuito anterior [21, 24]:

- Linac 3
- Low Energy Ring, LEIR

LHC

El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) por sus siglas en inglés, es un acelerador circular de 27 Km. de diámetro localizado en las inmediaciones de Ginebra, Suiza. Su objetivo principal es realizar colisiones a \sqrt{s} grandes para generar muchos eventos a grandes energías y, así, poder estudiar procesos fundamentales de la física a escalas microscópicas. El acelerador consta de 1232 dipolos magnéticos de 15 metros de largo para guiar los haces, y 392 cuadrupolos magnéticos de 5 y 7 metros de largo para colimar los haces. Como las corrientes que alimentan estos imanes se cuentan en el orden de los KA, se requiere que los componentes estén enfriados a una temperatura de -271.3° C para tener cables superconductores y que no generen calentamiento por resistencia eléctrica.

En cuatro puntos diferentes del anillo del LHC se encuentran 4 detectores de partículas con sus respectivos despachos y grupos de investigación. Cada una de estas 4 locaciones corresponden a un experimento mayor del LHC cuyos objetivos están enfocados a estudiar distintos aspectos de la física de partículas.

Los 4 experimentos principales son:

- ATLAS
- ALICE
- CMS
- LHCb

b. Conceptos de aceleradores

Haz

La fila de partículas que se acelera para hacerse colisionar. Un haz no es una hilera de partículas una detrás de otra, sino un conjunto consecutivo de trenes equiespaciados entre sí.

Paquete

Un conjunto de N partículas equiespaciadas entre sí. Como el LHC inyecta grupos de partículas a los aceleradores a una frecuencia de 40MHz, se puede tener hasta 3564 potenciales paquetes por órbita. El número de partículas en cada paquete es del orden de 10^{11} en el LHC.

Vagón

Un conjunto de cierto número de paquetes, separado a cierta distancia de los otros vagones.

Tren

Un conjunto de cierto número de vagones.

Órbita

Total de todas las partículas colisionantes.

BCID

Del inglés *Bunch Crossing Identifier*, es el número que permite identificar a cada paquete durante una corrida. Se asignan 3564 BCIDs a las señales detectadas durante una colisión.

Llenado o *Fill* y patrón de llenado

Cada vez que se utiliza el LHC, éste se llena ya sea con protones o iones pesados. A este proceso se le denomina llenado o **fill** en inglés, y el patrón de llenado es el orden, cantidad y espaciado de los paquetes que son añadidos durante el llenado.

c. Unidades

Barn

Unidad de área, utilizada en el campo de física de partículas, equivalente a 10^{-28}m^2 o un cuadrado con un lado de 10 fm.

Lumisection (LS)

Unidad de tiempo utilizada en física de partículas. Cada lumisection equivale a 23.36 segundos y su abreviación es LS.

d. Magnitudes características de un acelerador

Invariante s

Las colisiones de partículas en un acelerador son hechas a gran energía cinética, por lo que un buen indicador de desempeño de éstos es la cantidad de energía contenida por los haces al momento de la colisión. Pues nos indica qué tipos de eventos y en qué cantidad se pueden presentar. Como la norma de un vector es invariante ante transformaciones de Lorentz, se escoge la norma de la suma de cuadrimomentos de los haces como magnitud invariante para caracterizar las colisiones del acelerador [1].

$$s = (p_A + p_B)^2 = (\vec{p}_A + \vec{p}_B) \cdot (\vec{p}_A + \vec{p}_B) = p_A^2 + p_B^2 + 2\vec{p}_A \cdot \vec{p}_B. \quad (1.2)$$

Si la colisión ocurre en el centro de masa $p_a = p_b$:

$$s = 4p^2 = \frac{4E^2}{c^2}, \quad (1.3)$$

O en unidades donde $c = 1$:

$$s = 4p^2 = 4E^2, \quad (1.4)$$

Es por ello que siempre se especifica a qué $\sqrt{s} = 2E = E_{cm}$ se realizan las colisiones. Siendo E la energía de un haz y E_{cm} es la energía del centro de masa.

Sección eficaz σ

No se refiere a un ángulo sólido como de manera habitual. Sino a la plausibilidad de que ocurra una interacción entre una partícula incidente y una partícula objetivo

[1, 26]:

$$\sigma = \frac{\text{número de interacciones por unidad de tiempo por partícula objetivo}}{\text{flujo incidente}}. \quad (1.5)$$

Es una magnitud fundamental al determinar $R(t)$ y \mathcal{L} .

$R(t)$ y luminosidad instantánea

El ritmo al que varía el número de eventos de interés producidos en el tiempo, en un acelerador de partículas, es [1, 27]:

$$R(t) = \frac{dN}{dt}. \quad (1.6)$$

Más adelante se explica su relación con la luminosidad. La luminosidad instantánea, \mathcal{L}_{inst} se define como la cantidad de eventos de interés por unidad de Cross Section por unidad de tiempo [1, 27]:

$$\mathcal{L}_{inst} = \frac{1}{\sigma} \frac{dN}{dt}. \quad (1.7)$$

Así pues, se puede hallar la siguiente relación con $R(t)$ [1, 27]:

$$R(t) = \sigma \mathcal{L}_{inst}, \quad (1.8)$$

dejando en evidencia la observación que se hacía en la definición de σ .

En adición a esto, también se puede definir la luminosidad instantánea explícitamente en términos de la superposición de paquetes de partículas al momento de colisionar. Específicamente en términos de la densidad de partículas de cada bunch, de su forma y de su posición; pues cada uno de los paquetes colisionantes se encuentra en movimiento y el número de partículas en cada punto del espacio varía como se muestra en la siguiente figura [1, 28]:

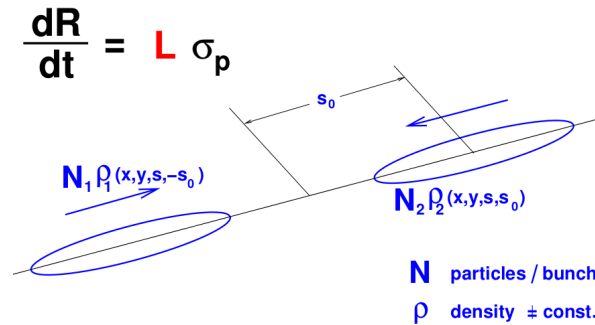


Figura 1.1: Diagrama de una colisión entre dos paquetes de un haz.

Entonces, se obtiene que la luminosidad instantánea se puede expresar como la siguiente relación [1, 28]:

$$\mathcal{L}_{instbunch} \propto K \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_1(x, y, s, -s_0) \rho_2(x, y, s, s_0) dx dy ds ds_0. \quad (1.9)$$

Donde $\rho_n(x, y, s, \pm s_0)$, con $n = 1, 2$, son las distribuciones de densidad de cada paquete en el tiempo t ; s es la posición de cada partícula dentro del paquete; s_0 es la distancia medida desde centro de masa del paquete hasta el punto de colisión, y K , un factor cinético relativista que aparece por el movimiento de los paquetes a velocidades relativistas, y se define como [1, 28]:

$$K = \sqrt{(\vec{v}_1 - \vec{v}_2)^2 - (\vec{v}_1 \times \vec{v}_2)^2/c^2}. \quad (1.10)$$

Ahora bien, considerando que los números de partículas de cada paquete de cada haz son N_1 para el primero y N_2 para el segundo, y que en total hay N_b paquetes en total; además de considerar que las densidades son no correlacionadas en todos los planos y que las colisiones son frontales, se consigue la expresión de la luminosidad instantánea total:

$$\mathcal{L}_{inst} = 2N_b N_1 N_2 \nu \int_{\mathbb{R}^4} \rho_{1x}(x) \rho_{1y}(y) \rho_{1s}(s - s_0) \rho_{2x}(x) \rho_{2y}(y) \rho_{2s}(s + s_0) dx dy ds ds_0. \quad (1.11)$$

Nótese dos cosas. La primera es que $K = 2$ si las velocidades son iguales pero en sentido opuesto (condición de cruce frontal). Por otro lado, la segunda anotación es que toda la expresión se necesita multiplicar por ν para obtener la luminosidad por unidad de tiempo (instantánea) en un movimiento periódico como en un acelerador circular.

e. Luminosidad integrada

La luminosidad integrada es el resultado de integrar la luminosidad instantánea en el tiempo:

$$\mathcal{L}_{int} = \int_0^t \mathcal{L}_{inst}(t') dt', \quad (1.12)$$

de lo que se deduce la siguiente relación [1, 27]:

$$N = \sigma \mathcal{L}_{int}. \quad (1.13)$$

Es por ello que es fundamental determinar la luminosidad integrada de un acelerador, para calcular cuántos eventos de interés ocurren en las colisiones.

II. Hipótesis y Objetivos

a. Planteamiento de la hipótesis

En esta tesis se plantearon dos niveles de contraste estadístico para cada parámetro $X \in \{\alpha, A, B\}$, correspondientes a dos preguntas físicas distintas.

Análisis global anual. La primera pregunta consiste en determinar si, al considerar toda la serie temporal de 2022 como una sola muestra, el parámetro X puede describirse de manera efectiva mediante un valor constante. Para este caso se consideran las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula $H_{0,\text{anual}}^X$. El parámetro X es *estacionario* en el tiempo dentro de las incertidumbres experimentales para un mismo patrón de llenado. Es decir, los valores medidos X_i son compatibles con un valor constante μ_X , de modo que las fluctuaciones observadas se explican únicamente por el error estadístico asociado a cada punto.

Hipótesis alternativa $H_{1,\text{anual}}^X$. El parámetro X presenta una *dependencia temporal sistemática* y, por lo tanto, la serie temporal completa de 2022 no puede describirse adecuadamente mediante un valor constante.

Análisis complementario en el régimen pre-gap. La segunda pregunta consiste en determinar si, dentro del subconjunto de datos previo a la brecha asociada al paro técnico anual del LHC, el parámetro X permanece constante o si un modelo lineal describe significativamente mejor la evolución temporal. Para este caso se consideran los siguientes modelos anidados:

Hipótesis nula $H_{0,\text{pg}}^X$. En el régimen *pre-gap*, el parámetro X puede describirse mediante un modelo constante,

$$X(t) = b_X. \quad (1.14)$$

Hipótesis alternativa $H_{1,\text{pg}}^X$. En el régimen *pre-gap*, el parámetro X requiere un modelo lineal,

$$X(t) = m_X t + b_X, \quad (1.15)$$

con $m_X \neq 0$.

En este segundo contraste, la pregunta de interés no es únicamente si la pendiente ajustada es compatible con cero, sino si el modelo lineal mejora de manera estadísticamente significativa al modelo constante cuando ambos se ajustan al mismo subconjunto de datos. Por ello, la comparación formal entre ambos modelos se realiza mediante la diferencia

$$\Delta\chi^2 = \chi_{H_0}^2 - \chi_{H_1}^2, \quad (1.16)$$

con un grado de libertad adicional, para evaluar si la mejora del modelo lineal es significativa [29].

En consecuencia, la prueba de hipótesis en esta tesis consiste en comprobar si los datos son compatibles con una descripción constante a escala anual global y, de manera complementaria, si dentro del régimen pre-gap existe evidencia estadísticamente significativa a favor de una dependencia temporal lineal [29].

Objetivos

Objetivo general

Estudiar la estabilidad temporal de los parámetros α , A y B del modelo de ruido utilizado en el método de *Pixel Cluster Counting* (PCC) para la medición de luminosidad en CMS, mediante el análisis de datos de 2022 y la aplicación de pruebas estadísticas de compatibilidad con un comportamiento constante en el tiempo.

Objetivos específicos

- a. Implementar y adaptar un código de ajuste que permita analizar rangos arbitrarios de BCIDs del conteo de cúmulos en PCC, obtener los parámetros α , A y B , y calcular sus residuos e incertidumbres.
- b. Comparar distintas configuraciones de muestra de BCIDs por bloque de 50 *lumi-sections* para evaluar el compromiso entre precisión estadística y costo computacional del ajuste.
- c. Seleccionar una muestra de análisis representativa y eficiente que permita estudiar la evolución temporal de los parámetros del modelo de ruido a lo largo del periodo considerado.
- d. Estimar los valores de α , A y B para los bloques de datos seleccionados de los *fills* de 2022 con el mismo patrón de llenado.
- e. Evaluar la compatibilidad temporal de los parámetros α , A y B con un modelo constante mediante una prueba de bondad de ajuste basada en χ^2 y el cálculo de p -valores.
- f. Determinar si existe evidencia estadísticamente significativa de deriva temporal en los parámetros del modelo de ruido de PCC dentro del periodo y alcance analizados.

Capítulo 2

CMS

Colaboración CMS, del inglés para *Solenoid Compacto de Muones* (*Compact Muon Solenoid*), toma su nombre del experimento que gira alrededor del detector CMS en el LHC, en CERN. Esta colaboración científica es una de las más grandes del mundo con 4000 profesionistas de 240 instituciones, de más de 50 países. Entre ellos, México está representado por la BUAP, CINVESTAV, la Universidad Iberoamericana y la Universidad de Sonora. Aunque CMS tome su nombre del hecho de que puede detectar muones, éste es un detector multipropósito. Como su nombre lo indica, el componente principal de CMS es un solenoide cilíndrico paralelo al haz de partículas, sobre el cual se construye la electrónica y las sucesivas capas de detectores. Derivado de este hecho, el experimento CMS es una estructura compleja compuesta de múltiples partes que pueden ser principalmente agrupadas en distintas capas, como se muestra en la figura a continuación [30]:

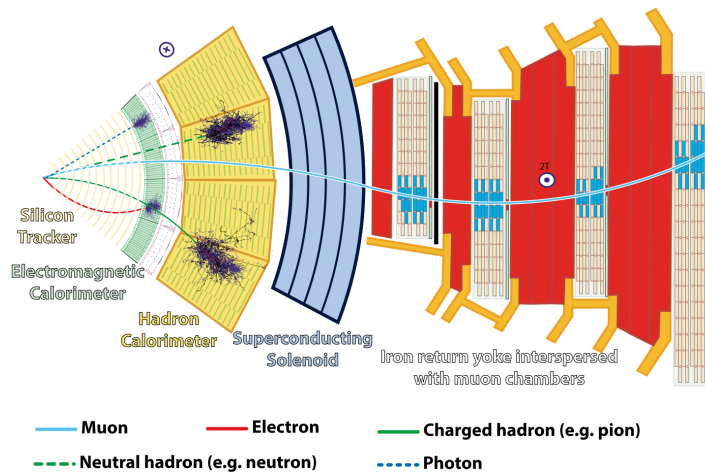


Figura 2.1: Corte coronal de las diferentes capas de CMS y en cuáles se detecta qué tipo de partícula.

I. Imán y yugo de acero

Como se dijo anteriormente, el componente principal de CMS es un solenoide. Dicho solenoide sirve como un electroimán de $4T$ que deflecta las trayectorias de las partículas cargadas, contrariamente al caso de las partículas sin carga eléctrica, permitiéndolas ser diferenciadas en el calorímetro. En adición a esto, se usa una contención metálica llamada «yugo metálico» de 14000 toneladas para confinar el campo magnético, que consta de capas de metal intercaladas con los detectores de muones. Las dimensiones de CMS son 21.6 metros de longitud y 14.6 metros de diámetro. Como se dijo antes, CMS es un detector multipropósito, por lo que se compone de distintas capas de detectores y electrónica para su correcto funcionamiento y medición de diferentes fenómenos [8, 28, 31].

II. Calorímetros: ECAL y HCAL

Un calorímetro es el conjunto de detectores cuya misión es medir la energía de las partículas, a diferencia de los rastreadores o *trackers*, que tienen como objetivo trazar sus trayectorias. Los calorímetros logran esto absorbiendo las partículas, es por eso que no sirven de rastreadores.

a. ECAL

CMS consta de dos calorímetros, el primero y más interno es el Calorímetro Electromagnético o *ECAL* del inglés *Electromagnetic Calorimeter* y, como su nombre lo indica, es el calorímetro que mide la energía de fotones, electrones y otros leptones. Esto lo logra estando construido principalmente por tungstato de plomo en fase cristalina enriquecido con oxígeno. Así pues se obtiene un material transparente y centelleante, de modo que electrones y fotones producen luz con energía proporcional a la energía de las partículas que pasan a través del material. Estos cristales de alta densidad producen luz en ráfagas de fotones cortas, rápidas y bien definidas para obtener un detector preciso, rápido y bastante compacto. Asimismo, los fotodetectores diseñados para trabajar bajo campos magnéticos muy intensos, son pegados en el reverso de cada uno de los cristales para detectar el centelleo y convertirlo en señales eléctricas que son amplificadas para su análisis. El ECAL está hecho de una sección barrilica y dos tapas, y forma una capa entre el sistema de rastreo y el HCAL. El barril cónico consta de 61200 cristales que forman 36 supermódulos que pesan alrededor de 3 toneladas cada uno. Las tapas sellan el barril en cada extremo y están hechas de casi 15000 cristales adicionales [8, 28, 31].

b. HCAL

Por otro lado, el calorímetro más externo de CMS es *HCAL* del inglés *Hadron Calorimeter*, es decir, Calorímetro de Hadrones. Como su nombre lo indica, este calorímetro

está diseñado para absorber y medir la energía de las partículas hechas de quarks y gluones que pasen a través de él. La forma en la que logra esto es disponiendo 36 capas de material absorbente y plástico centelleante, cada una de 26 toneladas, en forma de barriles concéntricos. Así, simplemente utiliza el efecto fotoeléctrico para ir midiendo la energía a través de la frecuencia de la luz que emite el material centellante cuando los hadrones pasan a través de él [8, 28, 31].

III. Sistema de muones

Es la parte más exterior del experimento y la que, junto al solenoide superconductor, le da nombre a éste. Su posición dentro del entramado de los módulos de detección de CMS se deriva del hecho de que la masa de los muones es 200 veces superior a la de los electrones, por lo que pueden escaparse del sistema de rastreo y los calorímetros. A cada módulo de detección que se encuentra después del solenoide superconductor, alternado con las diferentes capas del yugo de acero, toma el nombre de cámara de muones.

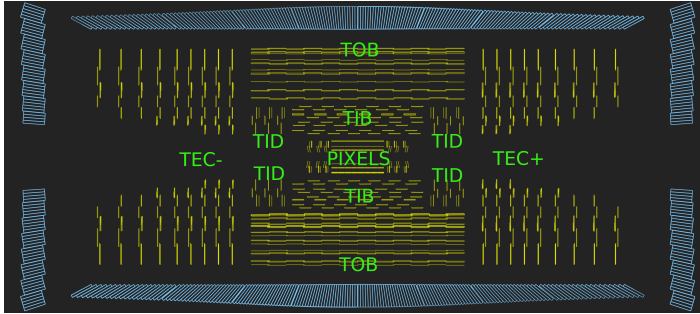
En total hay 1400 cámaras de muones, de las cuáles, 250 tubos de deriva (*Drift Tubes o DTs* en inglés) y 540 cámaras de tiras catódicas (*Cathode Strip Chambers o CSCs* en inglés) rastrean las trayectorias de las partículas y funcionan de gatillo para discriminar selecciones. Por otro lado, 610 cámaras de placas resistoras (*Resistive Plate Chambers (RPCs)* en inglés) sirven para corroborar el gatillo previo para conservar mediciones o no y poder filtrar ruido de fondo [8, 28, 31, 32].

IV. Sistema de rastreo (*Tracker*)

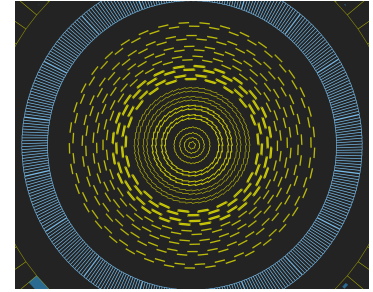
a. Visión general del tracker de silicio

Como se mencionó casi al principio de esta sección, los detectores de partículas multipropósito como CMS son capaces de brindar una gran cantidad de información acerca de los procesos físicos que tienen lugar durante una colisión en un acelerador de partículas como el LHC. Entre los cuales se encuentran la energía, el momento, la trayectoria y el tipo de partículas que surgen de las colisiones [33]. Algo que CMS consigue a través del rastreo de las trayectorias de partículas entre otros mecanismos. Siendo especialmente polivalente el primero, pues junto al campo magnético del solenoide superconductor, permite conocer el momento y la energía de las partículas a través de la curvatura de sus trayectorias, el tipo de partículas dependiendo de en qué capa del detector finalicen las trayectorias y obviamente, la trayectoria en sí. Finalmente, la trayectoria se determina detectando la posición de las partículas en diferentes puntos claves a lo largo de las diferentes capas del experimento [33]. El sistema que rastrea las trayectorias de las partículas cargadas generadas por colisiones en LHC, para reconstruir sus trayectorias y momentos, al igual que reconstruir vértices secundarios, se llama Sistema de Rastreo o su equivalente en inglés, *Tracker*. Consta de una sección cilíndrico-hexagonal de 5.8 metros de longitud y 2.5 metros de diámetro. Se compone

del Detector de Píxeles o **Pixel Detector** en inglés, y del Rastreador de Tiras de Silicio o **Silicon Strip Tracker** en inglés [33].



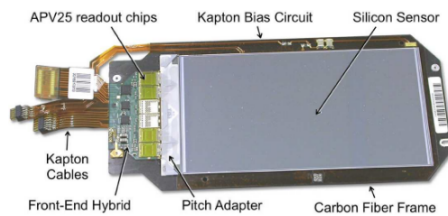
(a) Diagrama que muestra el corte sagital del sistema de rastreo de CMS, con todas sus partes etiquetadas [33].



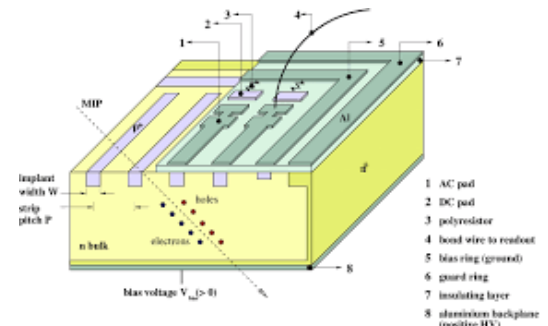
(b) Diagrama que muestra el corte transversal del sistema de rastreo de CMS [33].

Figura 2.2: Vistas laterales y frontales del sistema de rastreo de CMS y sus diferentes capas.

b. Rastreador de tiras de silicio (Silicon Strip Tracker)



(a) Diagrama mostrando las partes de un módulo de detección de tiras de silicio [34].



(b) Ilustración de la composición de un detector de tiras de silicio y su funcionamiento. [35].

Figura 2.3: Descripciones gráficas de los módulos de detección de tiras de silicio del rastreador de tiras de silicio en CMS.

El rastreador de tiras de silicio, del inglés *Silicon Strip Tracker/Strip Tracker*, es parte del sistema de rastreo de CMS y se compone, a su vez, de dos partes. En la parte interna está el Barril interno de Rastreo o *Tracker Inner Barrel (TIB)* y los Discos Internos de Rastreo *Tracker Inner Disks (TID)*, los cuales están divididos en cuatro capas de barril y tres discos en cada extremo. La segunda parte es la externa, y se compone del Barril Rastreador Externo *Tracker Outer Barrel (TOB)*, compuesto por seis capas de barril, y las Capas del extremo del rastreador *Tracker Endcaps (TEC)*

con 9 discos. El total de módulos de silicio utilizados en este rastreador son 15148, que cubren $198m^2$ de área. Su nombre viene del hecho de que esté compuesto de un total de 9.3 millones de tiras de silicio [8, 28, 31, 33].

TIB y TID

El TIB (barril interno) consta de cuatro capas concéntricas. El TID se compone de tres discos por lado, y cada disco se divide en tres anillos concéntricos, lo que permite instrumentar la región de transición barril–endcap manteniendo buena aceptación geométrica. Una fracción importante de la geometría usa módulos doble-cara (dos módulos simple-cara pegados espalda con espalda) con un ángulo estereoscópico relativo ~ 100 mrad, lo que permite reconstruir un “punto espacial” (coordenada z en barril y r en discos) donde están instalados. Estos módulos doble-cara se montan, entre otros, en las dos primeras capas del TIB y en los dos primeros anillos del TID [8, 28, 31, 33].

TOB y TEC

El TOB (barril externo) está formado por seis capas concéntricas. El TEC consiste en nueve discos por lado, cada uno con cuatro a siete anillos. En regiones externas (por ejemplo, módulos del TOB y anillos externos del TEC) se emplean con mayor frecuencia módulos con dos sensores, mientras que muchas regiones internas usan un solo sensor, optimizando resolución/ocupación frente a radiación y material [8, 28, 31, 33].

Sensores, módulos y electrónica

Cada módulo se monta sobre un marco de fibra de carbono/grafito, con una capa de kapton para aislamiento y conexiones al reverso del sensor; la lectura se realiza con un híbrido cerámico multicapa y un pitch-adapter de vidrio que enruta las tiras hacia la electrónica.

La electrónica frontal utiliza el chip APV25 (128 canales, tecnología CMOS $0.25 \mu\text{m}$). En modo deconvolución, el conformado tiene ~ 25 ns, y el chip incluye un pipeline de 192 celdas ($\sim 4.8\mu\text{s}$) para esperar la decisión del Level-1 trigger. La interconexión requiere un número muy grande de uniones por micro-bonding: del orden de ~ 25 millones de wire bonds para el rastreador completo. Los sensores son de silicio tipo-n con 512 o 768 tiras p+ (simple-cara), resistividad en el rango $1.25\text{--}7.5 k\Omega\cdot\text{cm}$, espesores de $320 \mu\text{m}$ o $500 \mu\text{m}$ y orientación cristalina $\langle 100 \rangle$. Para manejar radiación, las regiones internas usan menor resistividad ($1.25\text{--}3.25 k\Omega\cdot\text{cm}$) y $320 \mu\text{m}$, mientras que las externas usan mayor resistividad ($3.5\text{--}7.5 k\Omega\cdot\text{cm}$) y $500 \mu\text{m}$; el arranque operacional típico puede requerir tensiones del orden de ~ 300 V en sensores internos. El pitch varía aproximadamente entre $80\text{--}205 \mu\text{m}$, y el diseño busca una ocupación esperada del orden de $\sim 1\%$ a alta luminosidad. En cuanto a producción y aseguramiento de calidad, la fabricación de sensores se asignó a Hamamatsu (sensores delgados, $320 \mu\text{m}$) y ST Microelectronics (sensores gruesos, $500 \mu\text{m}$), con campañas de control que incluyen inspección óptica y

barridos de capacitancia/corriente de fuga hasta ~ 550 V (entre otras pruebas). El ensamblaje de módulos se realiza con estaciones tipo gantry (precisión ~ 10 μm), a ritmos del orden de ~ 90 módulos/día por estación, y los módulos pasan pruebas eléctricas (I–V hasta 450 V, pedestales/ruido, LED test, etc.). En producción (dic. 2005) se reportó que $\sim 3.5\%$ de módulos no pasan requisitos; por ejemplo, se rechaza si la corriente excede 10 μA a 450 V, y el nivel de tiras malas en módulos aceptados es del orden de 0.1% [8, 28, 31, 33].

c. Detector de píxeles (PD)

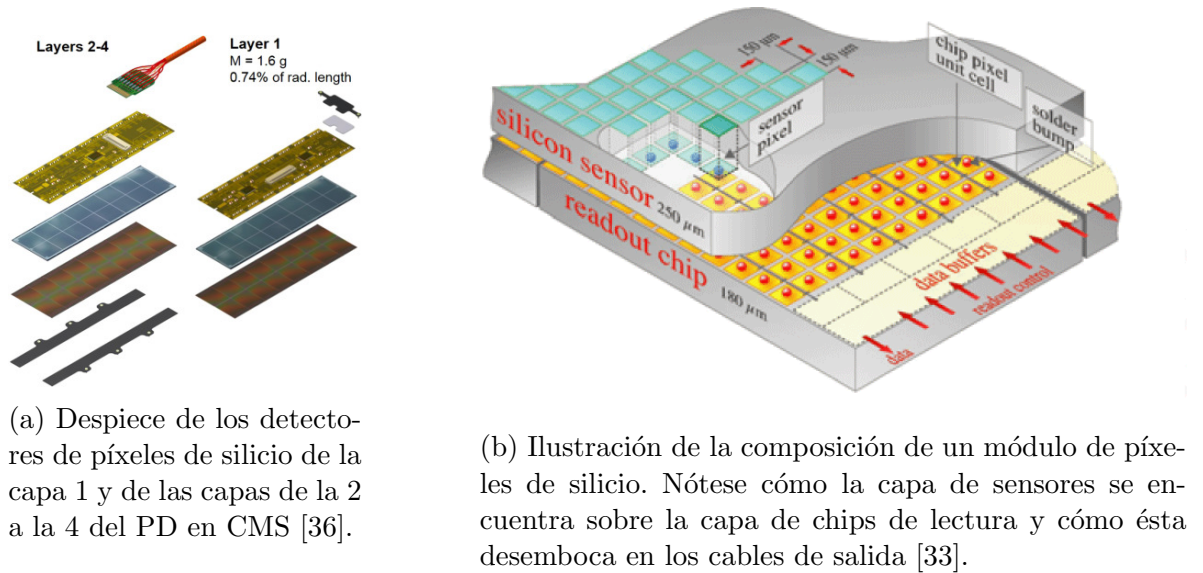


Figura 2.4: Descripciones gráficas de los módulos de detección de píxeles de silicio en PD como parte del sistema de rastreo de CMS.

La parte más interna del sistema de rastreo. Brinda una cobertura espacial de medición casi total, muy cercana al punto de las interacciones. Cubre pseudorapideces en un rango de $|\eta| < 2.5$. El detector está conformado por cuatro barriles concéntricos, BPIX, (L1-L4) con radios de 29,68,109,160 mm, respectivamente. También lo componen tres discos, FPIX, (D1-D3) en cada extremo, colocados a 291,396,516 mm desde el centro del detector. Su nombre viene del hecho de estar compuesto por 124 millones de celdas cuadrangulares de silicio (píxeles), en 1856 módulos. Los detectores de BPIX y FPIX se sustentan en cuatro semicilindros de servicio, con una longitud combinada de 540 mm. Estos semicilindros son *de servicio*, pues resguardan los circuitos de control y lectura, y guían a los cables de corriente, así como los tubos de enfriamiento [8, 28, 31, 33, 36].

Barril (BPIX)

El detector BPIX se divide en dos mitades independientes y mecánicamente auto-suficientes. Cada mitad tiene una mitad del detector y dos semicilindros de servicio. El detector BPIX está hecho de 1184 sensores modulares de silicio segmentados, orientados perpendicularmente al campo magnético del solenoide [8, 28, 31, 33, 36].

Discos de extremo (FPIX)

A diferencia del detector BPIX, el detector FPIX está dividido en cuatro cuadrantes mecánicamente independientes entre sí. Cada cuadrante está compuesto de tres discos orientados de forma radial en un semicilindro de servicio. La orientación radial de los discos se refiere a que el lado más largo de los píxeles está colocado paralelo a la dirección radial del detector cilíndrico. Así pues, 672 sensores modulares segmentados de silicio componen a FPIX. Cada uno subdividido en anillos interiores y exteriores, con 22 y 34 módulos cada uno [8, 28, 31, 33, 36].

Módulos, lectura y ROC

Cada módulo de detección de Pixel Detector está compuesto por un sensor plano de silicio con una dimensión de 18.6mm por 66.6mm, que contiene un área activa de 116.2mm por 64.8mm. Cada sensor comprende 160x416 píxeles bump-bonded en un arreglo de 2 por 8 chips de lectura o, en inglés, *readout chips* (ROC's). Cada ROC contiene 4160 canales de lectura, responsables de medir la altura del pulso de cada pixel. En total, 124 millones de canales de lectura. El tamaño estándar de cada pixel es $100\mu m$ por $150\mu m$. La forma en la que funciona un detector es la siguiente: se tiene celdas cúbicas de $25\mu m$ de silicio Tipo-P estampadas en el borde de un rectángulo de silicio Tipo-N $250\mu m$ de espesor. Esto genera un diodo polarizado con voltaje V . Entonces, cuando pasan partículas cargadas a través de los detectores, se genera una corriente con un voltaje amplificado. $P = 50\mu W$ por pixel [8, 28, 31, 33, 36].

d. Proceso de selección de cúmulos/clusters

Proceso a través del cual se obtiene una muestra de cúmulos de píxeles. El primer paso es discriminar las señales a partir de un cierto umbral de carga detectada. Cada cúmulo de píxeles que haya sido detectado por lo menos un total de 4000 electrones se considera válido. Luego, se representa a cada medición de un cúmulo de píxeles como una sola partícula cargada con el total de la carga detectada por el cúmulo. Luego, la posición y sus incertidumbres son estimadas en un sistema de coordenadas local y ortogonal con respecto al plano del sensor. Las partículas ionizantes mínimas que pasan a través de un sensor de silicio de $285\mu m$ de espesor, normalmente depositan energía equivalente a 21000 electrones cuando inciden normalmente. No obstante, esta carga se dispersa en varios píxeles debido a la deriva de Lorentz [26, 37].

Ahora bien, no todos los cúmulos activados serán utilizados. Para garantizar la estabilidad y precisión de la medición, se aplicará un proceso riguroso de selección de módulos del sistema de píxeles. Se excluirán los módulos que muestren comportamiento inestable, como aquellos de la primera capa de BPIX, que presentan ineficiencia dinámica a altos valores de pileup. La selección se divide en dos fases [26, 37]:

- Estabilidad temporal: Se analiza la evolución del peso del módulo a lo largo del tiempo, usando datos de disparos zero-bias. Los módulos cuyas desviaciones absolutas promedio superen un umbral especificado se eliminan iterativamente.
- Linealidad con respecto a la luminosidad: Se estudia la dependencia del peso del módulo con respecto a la luminosidad instantánea. Aquellos que no conserven un comportamiento lineal son también descartados.

Capa o Disco	# de módulos
L1	96
L2	224
L3	352
L4	512
D1 anillo interior	88
D1 anillo exterior	136
D2 anillo interior	88
D2 anillo exterior	136
D3 anillo interior	88
D3 anillo exterior	136

Cuadro 2.1: Número de módulos por capa o disco del PD.

Capítulo 3

Metodología

Para realizar un cálculo de luminosidad en CMS, la metodología estándar es la siguiente: a finales de cada año, se realiza un paro técnico del LHC con motivos de ajuste, renovación y preparación de futuros experimentos. Aquí es donde entra el primer paso y se aprovecha para calibrar luminómetros a través de los escaneos vdM¹ y se determina σ_{vis} . Luego se hace una selección de módulos estables, después se hace un ajuste de los datos a un modelo matemático que tiene en cuenta el ruido que inducen los fenómenos físicos secundarios de la colisión, se sustrae el ruido a las señales y se utiliza PCC para calcular la luminosidad. La incertidumbre se calcula utilizando propagación de errores estándar. Esta metodología es la que se siguió con los datos de conteo de cúmulos de píxeles para la corrida 362154 del LHC del año 2022, y para el conjunto de corridas de la 359268 a la 362760, medidos en CMS. Las técnicas y modelos que se utilizarán se explican más adelante:

I. Pixel Cluster Counting: PCC

El método Pixel Cluster Counting (PCC) estima la luminosidad de forma asíncrona (*offline* en inglés) utilizando el número promedio de cúmulos de píxeles en el detector de silicio del CMS. Este método aprovecha la alta densidad de píxeles en la región interna del sistema de rastreo, lo que reduce la probabilidad de que dos partículas cargadas impacten el mismo píxel en un mismo cruce de paquetes. El detector de píxeles está hecho de más de 124 millones de píxeles. Éste está diseñado para detectar partículas cargadas producidas en las colisiones y los cúmulos de píxeles se forman cuando varios píxeles colindantes son alcanzados por la misma partícula. Entonces, PCC se basa en asumir que el número de cúmulos de píxeles producidos es proporcional al número de colisiones y, por ende, a la luminosidad. La constante de proporcionalidad recibe el nombre de sección eficaz visible, σ_{vis} , o *visible cross section* en inglés. La cual se calcula según lo que se expone en el siguiente apartado². Como se mencionó anteriormente, PCC utiliza

¹Ver II. Método de Calibración de van der Meer (vdM scan).

²Ver II. Método de Calibración de van der Meer (vdM scan).

mediciones de luminosidad asíncrona en dos etapas: “luminosidad pronta” (*prompt-lumi* en inglés), que se lleva a cabo unos días después de la recolección de datos y se emplea una lista de módulos no optimizada, y “luminosidad asíncrona reprocesada” (*offline reprocessed luminosity* en inglés) que utiliza una lista de módulos ya optimizada según lo visto en d. Proceso de selección de cúmulos/clusters. Así pues, una vez obtenida una lista de módulos optimizados, se extrae el ruido de fondo al conteo de cúmulos según la sección III. Modelado y supresión de ruido. Posteriormente, solo se requiere calcular cuántos cúmulos en promedio se activan cada que un paquete colisiona, y junto a σ_{vis} obtenida durante la calibración, se obtiene la siguiente expresión para la luminosidad instantánea de un solo cruce de paquetes [26, 28, 37]:

$$\mathcal{L}_{instbunch} = \frac{\langle N_{clusters} \rangle \nu}{\sigma_{vis}}, \quad (3.1)$$

y así es como se calcula la luminosidad instantánea para un cruce de paquetes con el método PCC. En consecuencia, la luminosidad instantánea para todo el haz se obtiene de multiplicar la expresión anterior por N_b , es decir, el número de paquetes por haz.

II. Método de Calibración de van der Meer (vdM scan)

El método de van der Meer (vdM) permite calibrar de forma absoluta la luminosidad instantánea \mathcal{L} , determinando experimentalmente el solapamiento o traslape espacial de los haces colisionantes del LHC, sabiendo que el máximo en la medición de luminosidad instantánea ocurre cuando el solapamiento entre ambos haces es completo y frontal. Así pues, se hace colisionar sucesivos haces desfasados, alineándolos más con cada ensayo, y midiendo la luminosidad instantánea de cada colisión. De modo que se corrobora si se cumple que la medición en la cual se registra el valor máximo es en la que los haces se cruzaron completamente de frente. Esta técnica es fundamental para establecer el factor de conversión entre la tasa de eventos registrada y la luminosidad física [9, 31].

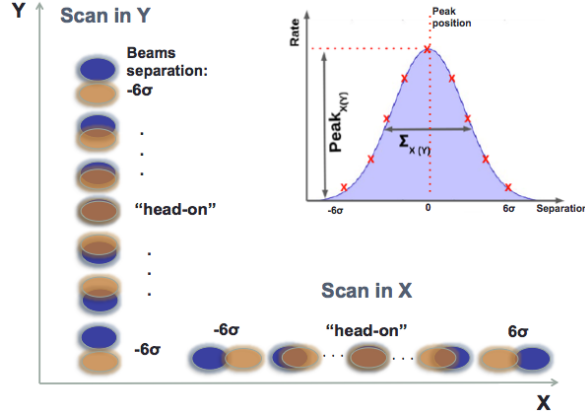


Figura 3.1: A la izquierda: escaneo de los haces con diferentes separaciones de $(\pm 3\Delta_x$ y $\pm 3\Delta_y$) en el plano transversal, horizontalmente se muestra el escaneo en el eje x y, verticalmente, en el eje y . A la derecha: distribución de R_x o R_y en función de la separación de los haces, donde se ve que Σ_x y su análogo Σ_y están relacionados con anchos de la distribución.

a. Fundamento teórico

Recordando, la luminosidad instantánea de un solo paquete o bunch es:

$$\mathcal{L}_{instbunch} = N_1 N_2 \nu \int_{-\infty}^{\infty} \rho_1(x, y) \rho_2(x, y) dx dy, \quad (3.2)$$

con $\rho_n(x, y) = \rho_{nx}(x) \rho_{ny}(y)$ y $n = 1, 2$. Lo que permite reescribir la integral anterior como [9, 31]:

$$\mathcal{L}_{instbunch} = N_1 N_2 \nu \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{1x}(x) \rho_{2x}(x) dx \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{1y}(y) \rho_{2y}(y) dy. \quad (3.3)$$

Estas dos expresiones son fundamentales en vdM, pues esta técnica determina las integrales de traslape a través de la medición de R en dirección x e y como función de la separación de los haces en cada dirección (Δ_x, Δ_y) . Lo que se expresa en las siguientes dos ecuaciones [9, 31]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \rho_{1x_i}(x_i) \rho_{2x_i}(x_i) dx = \frac{R(0)}{\int R_{x_i}(\Delta) d\Delta x_i}, \quad (3.4)$$

donde $x_i = \{x, y\}$, $R_{x_i}(0)$ es R medido en la dirección x_i cuando los haces estaban perfectamente alineados y $R_{x_i}(\Delta x_i)$ es la medición de R cuando los centros de los haces están separados Δx_i en dirección x_i . Con esto, se puede definir las anchos de solapamiento o de traslape en dirección x_i de los paquetes de partículas como [9, 31]:

$$\Sigma_{x_i} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} R_{x_i}(x_i) d\Delta x_i}{R_{x_i}(0)}. \quad (3.5)$$

Con lo que la luminosidad instantánea para un solo paquete en el pico del escaneo, resulta [9, 31]:

$$\mathcal{L}_{inst_{bunch}} = \frac{N_1 N_2 \nu}{2\pi \Sigma_x \Sigma_y}. \quad (3.6)$$

Cálculo de la sección eficaz visible

A partir de los valores medidos de $R(0, 0)$, Σ_x , Σ_y , N_1 , N_2 y f , se obtiene la constante de calibración del luminómetro [9, 26, 31]:

$$\sigma_{vis} = \frac{2\pi \Sigma_x \Sigma_y R(0, 0)}{N_1 N_2 \nu}. \quad (3.7)$$

Este valor permite convertir tasas registradas por el luminómetro en medidas absolutas de luminosidad durante corridas normales de física.

III. Modelado y supresión de ruido

Para obtener mediciones precisas de la luminosidad instantánea a través de PCC, se tiene que medir adecuadamente el número de cúmulos activados por cada colisión de paquetes para promediarlo. El problema, es que existe una variedad de fenómenos que pueden activar los píxeles de silicio sin que estas señales sean realmente productos de colisiones entre paquetes de partículas. Es por ello que se consideran tres tipos principales de ruido, los cuales fueron estudiados en este trabajo, clasificados de la siguiente manera [26, 37]:

- Pedestal: Ruido constante en el número total de cúmulos.
- Tipo 1 (α): Partículas secundarias generadas por efectos posteriores a la colisión (afterglow), especialmente en cruces de paquetes adyacentes.
- Tipo 2 (A y B): Productos de activación del material que siguen una ley de decaimiento exponencial con amplitud A y constante de tiempo B .

Estos efectos se modelan y ajustan a través de plantillas generadas por datos de referencia. La corrección se aplica bloque por bloque (cada 50 lumisecciones), garantizando estabilidad en el tiempo y minimizando sesgos residuales. El modelo utilizado actualmente es [26, 37]:

$$F(x) = \sum_{k=0}^{N_{bcid}} N_k [\delta_{x,k} + \alpha \delta_{x,k+1} + A(x - k \geq 1) e^{-B(x-k-1)}]. \quad (3.8)$$

Donde x es el BCID de la órbita, k recorre los BCIDs colisionantes y N_k es el número de clusters asociado al BCID colisionante k . Por otro lado, α corresponde al ruido de

tipo 1, mientras que A y B corresponden al tipo 2. De la ecuación anterior, se puede observar claramente que α y A son adimensionales, mientras que B tiene unidades inversas de tiempo. Para propósitos de este trabajo, siempre que aparezca un valor de α o de A , éste no tendrá unidades. Por otro lado, en este trabajo, el tiempo se expresa en unidades de cruces de paquetes (*bunch crossings* o BX en inglés), por lo que B se reporta en unidades de BX^{-1} . Dado que $1 BX=25$ ns es posible convertir B a unidades físicas de tiempo inverso.

IV. Estudio de la dependencia temporal de los parámetros del modelo de α , A y B

Construcción, reconstrucción e implementación de código

- Se modificó y reconstruyó un código preexistente, de modo que pudiera ajustar un rango arbitrario de BCIDs (`firstbcid,lastbcid`) al modelo de ruido. Para ello, se añadió la funcionalidad de discriminar a los BCIDs colisionantes a través de un umbral de un conteo bruto de cúmulos de píxeles mayor a 150 ($RawPCC \geq 150$ en inglés), seleccionado por método gráfico. Además de obtener los residuos del ajuste.
- Se creó un código que realiza la propagación de errores y grafica los parámetros del ajuste en función del tiempo con barras de error, el promedio estimado, la incertidumbre del promedio y el error promedio de los puntos.

Selección de una muestra

- Corroboración del funcionamiento del código con 1 BCID

Para corroborar el correcto funcionamiento del nuevo código, primero se ajustó únicamente el primer BCID colisionante de cada bloque de 50 lumisections en toda la corrida 362154, se guardó los parámetros de cada uno de los ajustes de cada bloque y se graficó en función del tiempo.

- Ajuste con N BCIDs Después, para estudiar la dependencia temporal de los parámetros del modelo de ruido con significancia estadística, se realizó el mismo ajuste que con un BCID, pero con los primeros N BCIDs de cada bloque de 50 lumisections para usar éste como grupo de control, dado el bajo nivel de ruido de tipo 2 acumulado de las colisiones adyacentes.

Este procedimiento se llevó a cabo con un vagón, un tren, dos trenes y cuatro trenes:

Se graficó los resultados de los ajustes, residuos y evolución temporal de los parámetros de ruido para cada ensayo y se hizo una comparación de precisión vs. tiempo de ejecución

para todos los ensayos, para seleccionar la muestra más eficiente y precisa para realizar el análisis final.

- Análisis de todo el año

Una vez seleccionada la muestra de 480 BCIDs por bloque de 50 lumisections, se realizó el análisis para todos los fills de 2022 con el mismo patrón de llenado (1623). A partir de este conjunto se construyeron las series temporales de los parámetros α , A y B , con sus respectivas incertidumbres estadísticas, usando como variable temporal el índice del bloque de 50 lumisections.

Sobre estas series se aplicaron dos contrastes estadísticos complementarios. El primero fue un análisis global anual, en el que se consideró toda la serie temporal de 2022 como una sola muestra. En este caso, el objetivo fue determinar si, a escala anual, cada parámetro podía describirse de manera efectiva mediante un valor constante. Para ello se realizó un ajuste ponderado a constante y una prueba de bondad de ajuste con hipótesis nula $H_{0,\text{anual}}^X : X(t) = \mu_X$, donde μ_X es constante.

Sin embargo, la inspección visual de las series temporales mostró la presencia de una brecha alrededor del índice 1538, después de la cual cambia el comportamiento de los parámetros. Dado que esta discontinuidad coincide con el paro técnico anual del LHC, se interpretó como la separación entre dos regímenes operativos distintos. Por esta razón, además del análisis global anual, se realizó un análisis complementario restringido al subconjunto de datos previo a dicha brecha, al que en lo sucesivo se denominará régimen *pre-gap*.

En este segundo análisis, el interés ya no fue probar únicamente estacionariedad global, sino comparar directamente un modelo constante con un modelo lineal dentro de un intervalo operacionalmente homogéneo. Para ello, cada parámetro $X \in \{\alpha, A, B\}$ se ajustó en el régimen pre-gap con los modelos

$$X_{H_0}(t) = b_X, \quad (3.9)$$

y

$$X_{H_1}(t) = m_X t + b_X. \quad (3.10)$$

Así, el análisis complementario permitió cuantificar tanto la calidad absoluta de cada ajuste como la mejora relativa del modelo lineal sobre el constante.

Conjunto de datos

Para cada parámetro X se dispone de un conjunto de N mediciones:

$$\{(t_i, X_i, std(X_i))\}_{i=1}^N, \quad (3.11)$$

donde:

- t_i es la etiqueta temporal (índice del bloque de 50 lumisections) ordenada cronológicamente,

- X_i es el valor del parámetro de afterglow obtenido en el bloque i ,
- $std(X_i)$ es la incertidumbre estadística asociada a X_i .

Estos valores se leyeron de los logs generados durante el desarrollo de la metodología expuesta en IV. Análisis de todo el año y son aquéllos sobre los cuales se realizaron las pruebas de hipótesis para el análisis global anual y para el análisis complementario en el régimen pre-gap.

Prueba principal: ajuste a constante mediante χ^2

La primera prueba de estabilidad temporal se basó en ajustar un modelo constante a la serie anual completa de cada parámetro. Bajo $H_{0,\text{anual}}^X$, se supone que el valor verdadero de X no depende del tiempo:

$$X(t) = \mu_X = \text{constante.} \quad (3.12)$$

Dado que cada punto X_i posee una incertidumbre $std(X_i)$, se asignó a cada medición un peso [38, 39]:

$$w_i = \frac{1}{std(X_i)^2}. \quad (3.13)$$

La mejor estimación de la constante μ_X se obtiene como media ponderada [38, 39]:

$$\mu_X = \frac{\sum_{i=1}^N w_i X_i}{\sum_{i=1}^N w_i}, \quad std(\mu_X) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^N w_i}}. \quad (3.14)$$

La compatibilidad de los datos con este modelo constante se evaluó mediante el estadístico de bondad de ajuste χ^2 [29, 38, 39]:

$$\chi_{\text{anual}}^2 = \sum_{i=1}^N w_i (X_i - \mu_X)^2, \quad (3.15)$$

con un número de grados de libertad

$$\text{ndf}_{\text{anual}} = N_{\text{usados}} - 1, \quad (3.16)$$

donde N_{usados} es el número de puntos con incertidumbre válida. Bajo la hipótesis nula, el estadístico χ_{anual}^2 sigue, en buena aproximación, una distribución χ^2 con $\text{ndf}_{\text{anual}}$ grados de libertad. A partir del valor observado se calculó el p -valor como la probabilidad de cola derecha

$$p_{\text{anual}} = P(\chi_{\text{teórica}}^2 \geq \chi_{\text{obs}}^2 \mid H_{0,\text{anual}}^X). \quad (3.17)$$

En este contexto, el significado de p_{anual} es el siguiente: si el parámetro fuera realmente constante, p_{anual} cuantifica qué tan probable sería observar una discrepancia entre los datos y el modelo constante al menos tan grande como la medida. Un valor grande

de p_{anual} (típicamente $p_{\text{anual}} > 0,05$) indica que las fluctuaciones observadas son compatibles con el modelo constante, por lo que no se rechaza $H_{0,\text{anual}}^X$. Por el contrario, un valor pequeño (por ejemplo $p_{\text{anual}} < 0,05$) sugiere que sería poco probable obtener un χ^2 tan grande si el parámetro fuera realmente constante, lo que proporciona evidencia contra $H_{0,\text{anual}}^X$ y a favor de una dependencia temporal [29, 39].

En la discusión de resultados se consideraron tanto el valor de p_{anual} como el cociente $\chi_{\text{anual}}^2/\text{ndf}_{\text{anual}}$. Valores de $\chi^2/\text{ndf} \approx 1$ son indicativos de un acuerdo razonable con el modelo constante, mientras que $\chi^2/\text{ndf} \gg 1$ apunta a una descripción deficiente por una constante o a una posible subestimación de las incertidumbres.

Prueba complementaria: comparación entre un modelo constante y un modelo lineal en el régimen pre-gap

Además de la prueba principal basada en un ajuste a constante de la serie anual completa, en este trabajo se realizó una segunda prueba de hipótesis para estudiar la posible presencia de deriva temporal dentro del régimen pre-gap. Esta prueba se motivó por la inspección visual de las series temporales completas, en las que se identificó una brecha asociada al paro técnico anual del LHC. Dado que este evento modifica las condiciones operativas del acelerador y del detector, se seleccionó como subconjunto de estudio el conjunto de datos previo a dicha brecha, al que en lo sucesivo se denomina régimen *pre-gap*.

Para cada parámetro $X \in \{\alpha, A, B\}$ se ajustaron dos modelos anidados sobre el mismo subconjunto de datos:

$$X_{H_0}(t) = b_X, \quad (3.18)$$

$$X_{H_1}(t) = m_X t + b_X, \quad (3.19)$$

donde t es la variable temporal expresada en unidades de bloques de 50 lumisections, b_X es la ordenada al origen y m_X es la pendiente del ajuste lineal. Ambos modelos se estimaron mediante mínimos cuadrados ponderados con pesos

$$w_i = \frac{1}{\text{std}(X_i)^2}, \quad (3.20)$$

con $\text{std}(X_i)$ la incertidumbre estadística asociada a cada punto [29, 38, 39].

Estadístico del modelo constante en el régimen pre-gap. Para el modelo constante $H_{0,\text{pg}}^X$, el estadístico se definió como

$$\chi_{H_0}^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(X_i - b_X)^2}{\text{std}(X_i)^2}, \quad (3.21)$$

con

$$\text{ndf}_{H_0} = N_{\text{usados}} - 1. \quad (3.22)$$

Estadístico del modelo lineal en el régimen pre-gap. Para el modelo lineal $H_{1,\text{pg}}^X$, el estadístico se definió como

$$\chi_{H_1}^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(X_i - (m_X t_i + b_X))^2}{std(X_i)^2}, \quad (3.23)$$

con

$$\text{ndf}_{H_1} = N_{\text{usados}} - 2, \quad (3.24)$$

pues en este caso se ajustan dos parámetros libres: m_X y b_X .

Comparación formal entre modelos anidados. La prueba principal para decidir si el modelo lineal mejora significativamente al modelo constante se basó en la diferencia de estadísticos

$$\Delta\chi^2 = \chi_{H_0}^2 - \chi_{H_1}^2, \quad (3.25)$$

y en la diferencia en el número de grados de libertad

$$\Delta\text{ndf} = \text{ndf}_{H_0} - \text{ndf}_{H_1} = 1. \quad (3.26)$$

Como H_0 y H_1 son modelos anidados y el modelo lineal incorpora un único parámetro adicional, bajo la hipótesis nula la cantidad $\Delta\chi^2$ se distribuye, en buena aproximación, como una χ^2 con $\Delta\text{ndf} = 1$ grado de libertad [29, 38, 39]. Por lo tanto, el p -valor final de comparación se calculó como

$$p_{\text{final}} = P(\chi_{\Delta\text{ndf}}^2 \geq \Delta\chi^2). \quad (3.27)$$

Su significado es el siguiente: si el modelo constante fuera suficiente, p_{final} mide qué tan probable sería obtener una mejora en χ^2 tan grande como la observada, o mayor, al añadir una pendiente libre. Un valor pequeño de p_{final} indica que la mejora del modelo lineal es demasiado grande para atribuirse al azar y constituye evidencia a favor de una deriva temporal lineal dentro del régimen pre-gap.

Criterio de aceptación de la hipótesis de estabilidad

En conjunto, la hipótesis de ausencia de dependencia temporal del afterglow se consideró respaldada cuando [29, 39]:

- a. El ajuste a constante de la serie anual completa produjo un valor de χ^2/ndf razonable y un p -valor compatible con $H_{0,\text{anual}}^X$, es decir, $p_{\text{anual}} > 0,05$.
- b. En el régimen pre-gap, la comparación formal entre el modelo constante y el modelo lineal produjo un valor de $p_{\text{final}} > 0,05$, de modo que la mejora del modelo lineal no fue estadísticamente significativa.

En cambio, se interpretó que existe evidencia estadísticamente significativa de deriva temporal lineal dentro del régimen pre-gap cuando el modelo lineal mejoró al modelo constante con $p_{\text{final}} < 0,05$. En la presentación de resultados, la decisión estadística principal para este contraste se basó en $\Delta\chi^2$ y p_{final} .

Capítulo 4

Resultados y discusión

I. Ajustes y selección de muestra

Como se describió en la metodología, la primera etapa del análisis fue ajustar los datos de conteo de cúmulos de la corrida 362154, medida por CMS en el año 2022, al modelo de ruido descrito en la sección anterior con diferentes números de BCIDs, con el objetivo de obtener distintas estimaciones de los parámetros de ruido con sus respectivas propagaciones de errores y realizar una comparación entre precisión del ajuste y el número de BCIDs para escoger una muestra con la que se llevó a cabo el análisis de deriva temporal para todas las corridas con el mismo patrón de llenado del año 2022.

a. Ajuste de un solo BCID

Primeramente, se hizo el ajuste con un solo BCID en una ventana de 50 LS como se muestra a continuación y se obtuvieron sus residuos. Para este caso, dado el tamaño de la muestra utilizada para el ajuste, no se obtuvieron estimaciones de los parámetros de ruido con propagación de errores ni análisis de su comportamiento temporal. No obstante obtener un ajuste con esta cantidad de BCIDs nos permite asegurarnos del correcto funcionamiento de las herramientas computacionales empleadas. Una vez corroborado este punto, como se muestra abajo en las imágenes, se procedió con el resto del análisis para N BCIDs.

Ajuste

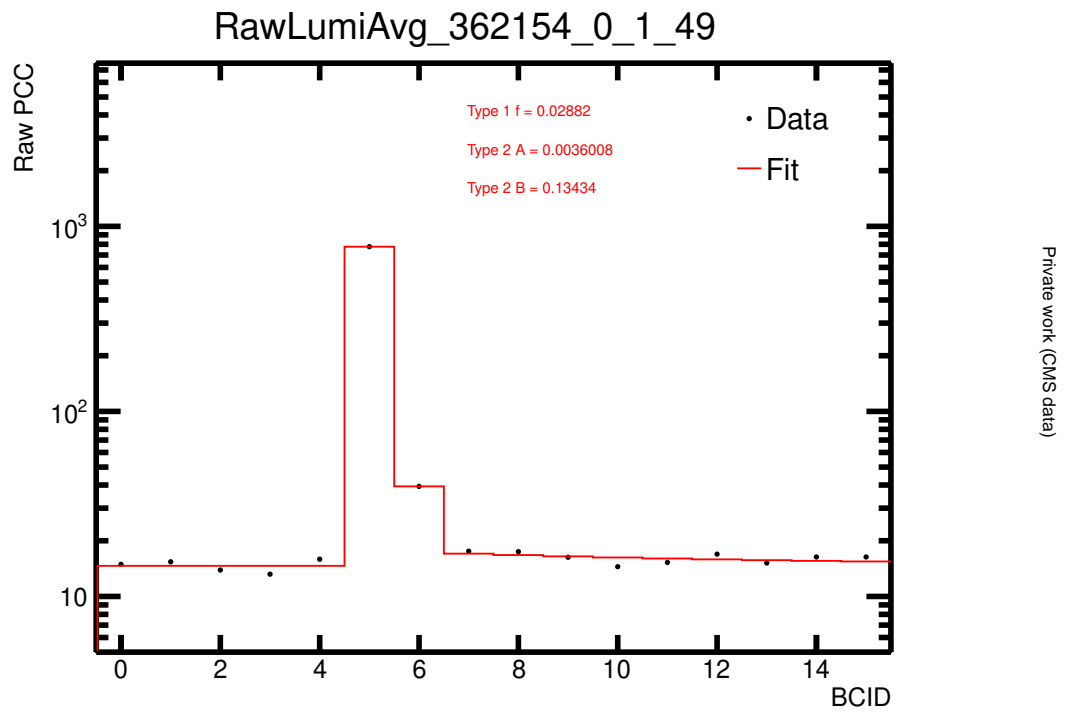


Figura 4.1: Ajuste de un solo BCID de la corrida 362154 de CMS para corroborar el funcionamiento del código de ajuste y cálculo de residuos.

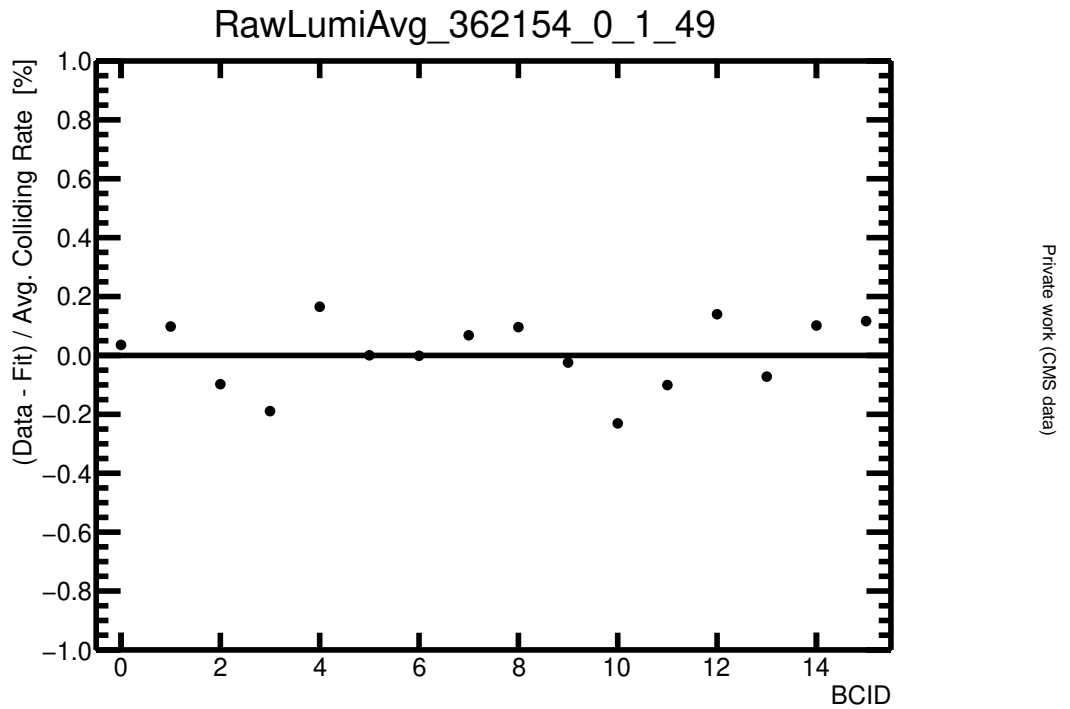


Figura 4.2: Residuos del ajuste de un solo BCID de la corrida 362154 de CMS para corroborar el funcionamiento del código de ajuste y cálculo de residuos.

b. Ajuste con N BCIDs

Una vez realizado el ajuste con un solo BCID, se procedió a realizar el análisis completo para muestras de varios BCIDs, comenzando con 60, luego con 260, posteriormente con 480 y finalmente con 940. Esta comparación permite evaluar cómo cambia la calidad estadística de los parámetros ajustados conforme aumenta el número de BCIDs incluidos, así como identificar el punto en el que la mejora en precisión deja de compensar el incremento en costo computacional.

Un vagón (60 BCIDs)

Para la configuración de 60 BCIDs, correspondiente a un solo vagón, se realizó el ajuste del modelo de ruido en cada bloque de 50 lumisections de la corrida 362154, para el cual, las figuras 4.3 y 4.4 muestran ejemplos representativos del ajuste y de sus residuos. En esta configuración ya es posible obtener estimaciones de $\alpha = 0,0287$, $A = 0,0017$ y $B = 0,051$, pero con incertidumbres relativamente grandes, particularmente para los parámetros asociados al ruido de tipo 2. Esto indica que la muestra aún es limitada para un estudio temporal preciso¹.

¹Ver d. Análisis de precisión vs. eficiencia.

- Ajuste y residuos

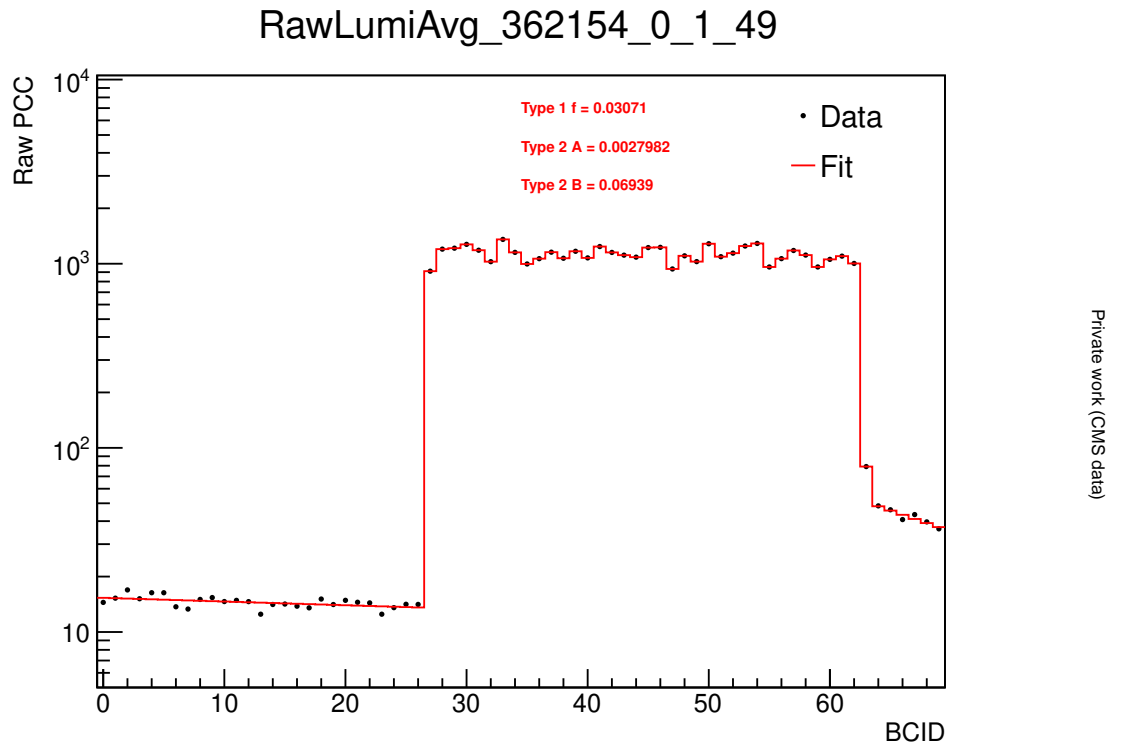


Figura 4.3: Ejemplo representativo del ajuste del modelo de ruido de PCC para la muestra de 60 BCIDs en la corrida 362154 de CMS.

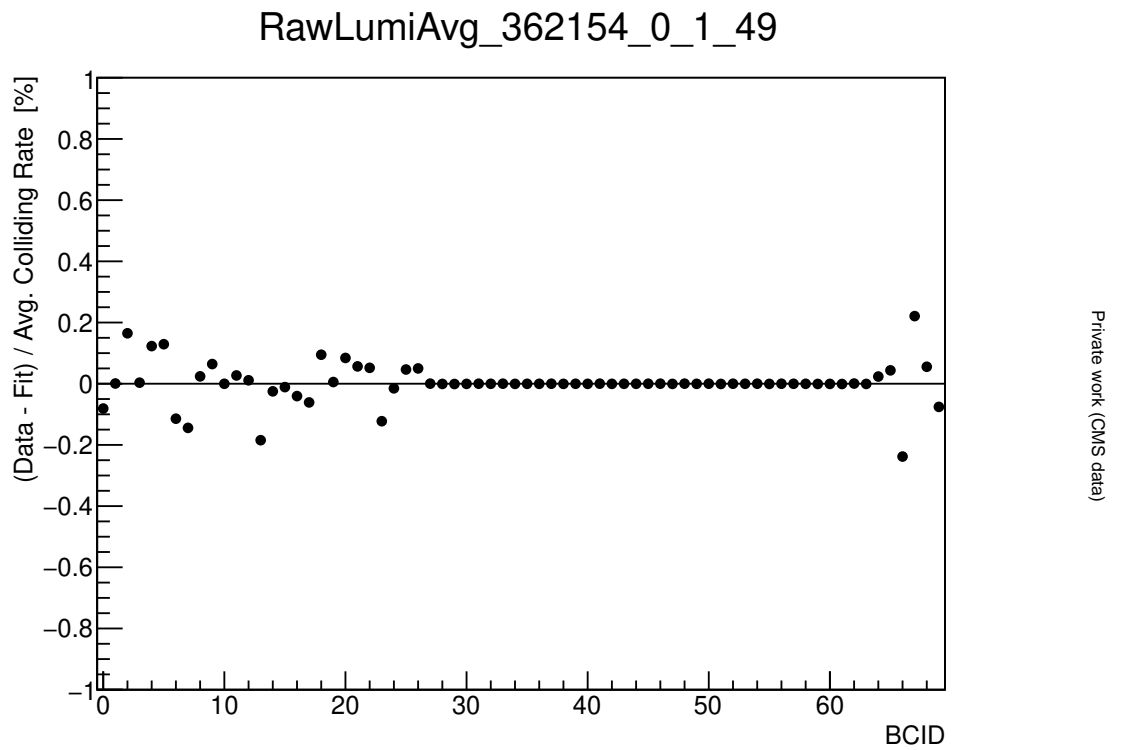


Figura 4.4: Residuos correspondientes al ejemplo representativo del ajuste del modelo de ruido de PCC para la muestra de 60 BCIDs en la corrida 362154 de CMS.

Un tren (260 BCIDs)

En esta subsección, se exponen los resultados para la configuración de 260 BCIDs, correspondiente a un solo tren, a la cual se realizó el ajuste del modelo de ruido en cada bloque de 50 lumisections de la corrida 362154. Las figuras 4.5 y 4.6 muestran ejemplos representativos del ajuste y de sus residuos. En esta configuración ya es posible obtener estimaciones de $\alpha = 0,0319$, $A = 0,0011$ y $B = 0,0158$. En este caso, las incertidumbres se vieron reducidas casi a la mitad para α y en un 90% para A y B^2 . No obstante, como la relación entre el tamaño de la muestra y la precisión de los ajustes todavía recompensa el aumentar el tamaño de la muestra y el ajuste converge, pues los residuos de los BCIDs colisionantes son prácticamente 0, se procedió a duplicar el número de trenes en lugar de asentar el tamaño de la muestra en un solo tren.

- Ajuste y residuos

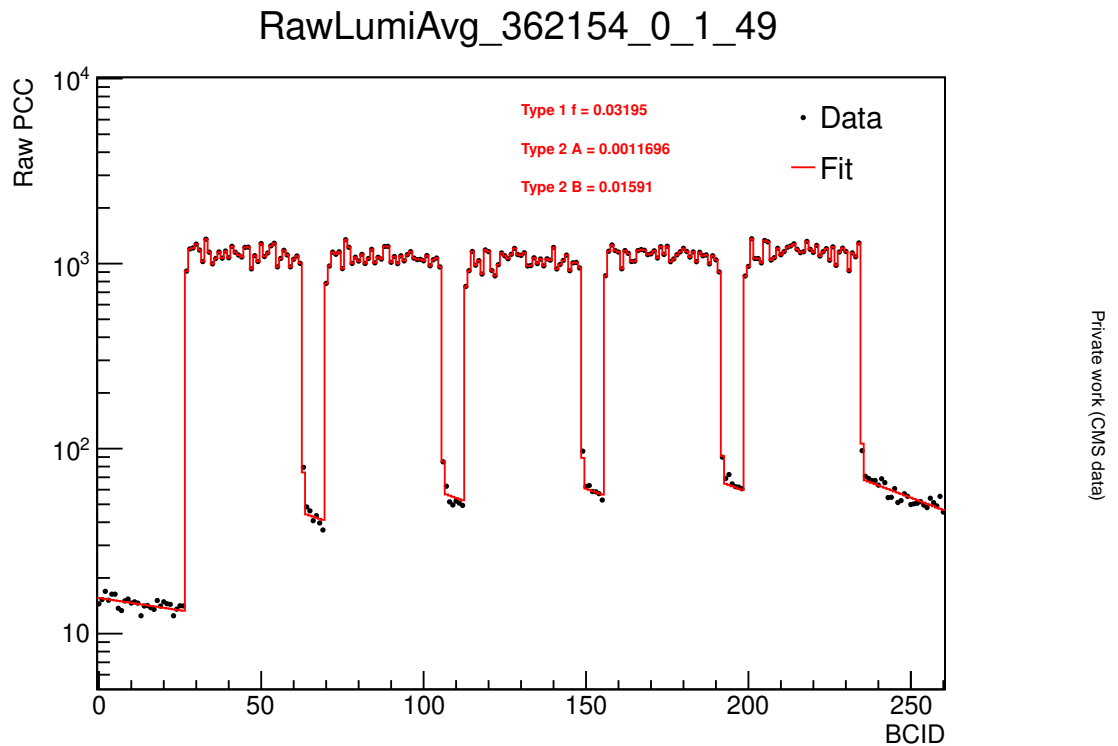


Figura 4.5: Ejemplo representativo del ajuste del modelo de ruido de PCC para la muestra de 260 BCIDs en la corrida 362154 de CMS.

²Ver d. Análisis de precisión vs. eficiencia.

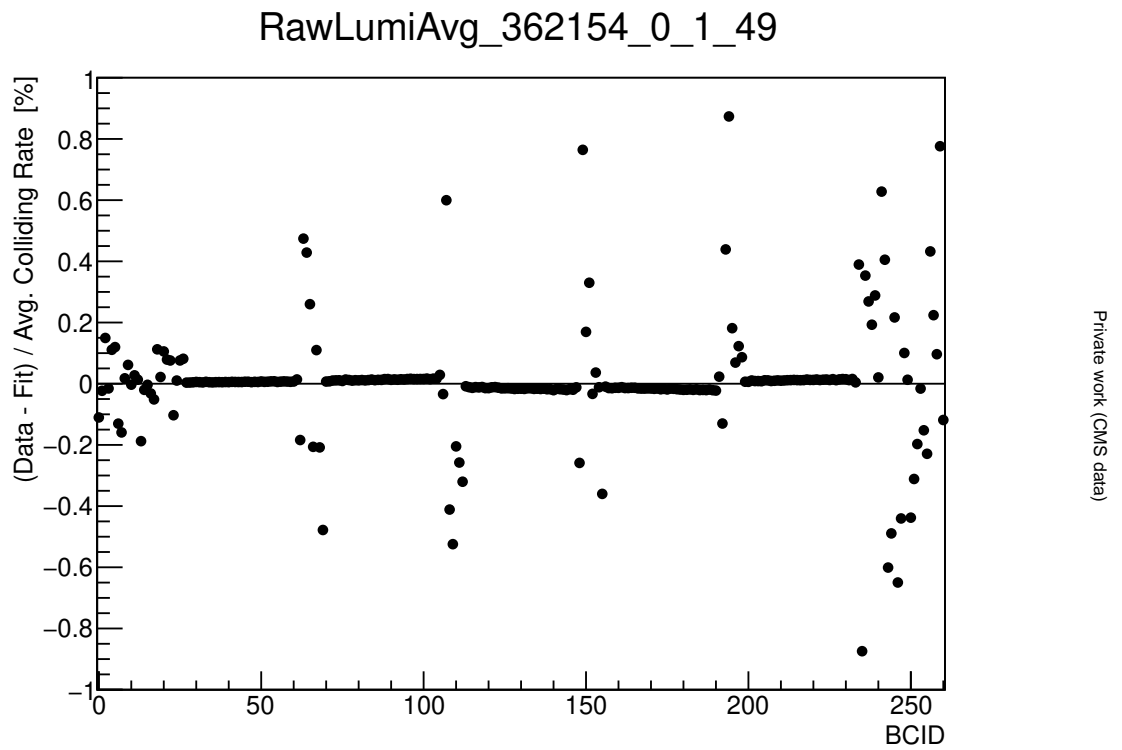


Figura 4.6: Residuos correspondientes al ejemplo representativo del ajuste del modelo de ruido de PCC para la muestra de 260 BCIDs en la corrida 362154 de CMS.

Dos trenes (480 BCIDs)

En esta subsección se exponen los resultados de haber realizado el análisis completo para selección de muestra, descrito en la metodología, pero para los primeros dos trenes (480 BCIDs) de cada sección de 50 LS que conforma la corrida 362154 de CMS. En primer lugar, se ajustó el conteo de cúmulos de este primer vagón obteniendo un valor de $\alpha = 0,0326$, $A = 0,0012$ y $B = 0,0145$ y se calcularon los residuos del ajuste. Para este caso, las incertidumbres se redujeron en un promedio del 3.3 % para los tres parámetros duplicando el número de la muestra³. Con lo que ya se nota una reducción significativa de la relación entre precisión y tamaño de la muestra, con lo que dos trenes es un buen candidato a ser la elección de muestra definitiva. Además, el ajuste todavía converge, pues los residuos de los BCIDs colisionantes son 0 o prácticamente nulos. Sirvan como ejemplos de un ajuste y del cálculo de sus residuos las figuras 4.7 y 4.8.

- Ajuste y residuos

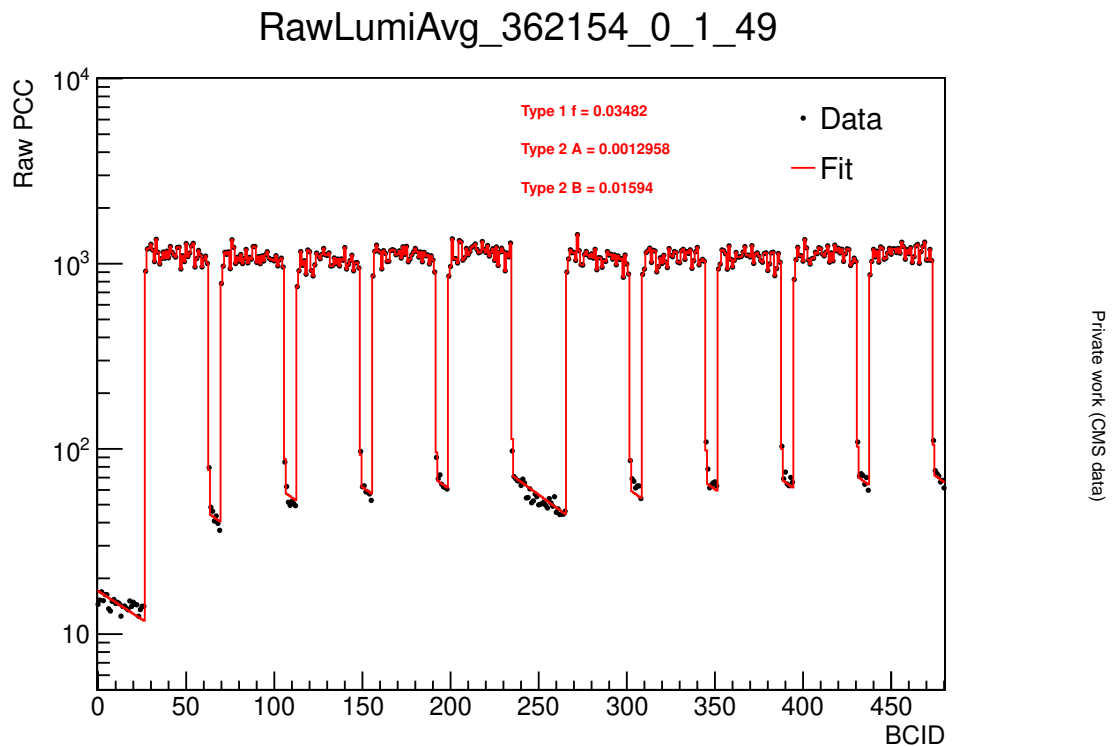


Figura 4.7: Ejemplo representativo del ajuste del modelo de ruido de PCC para la muestra de 480 BCIDs en la corrida 362154 de CMS.

³Ver d. Análisis de precisión vs. eficiencia.

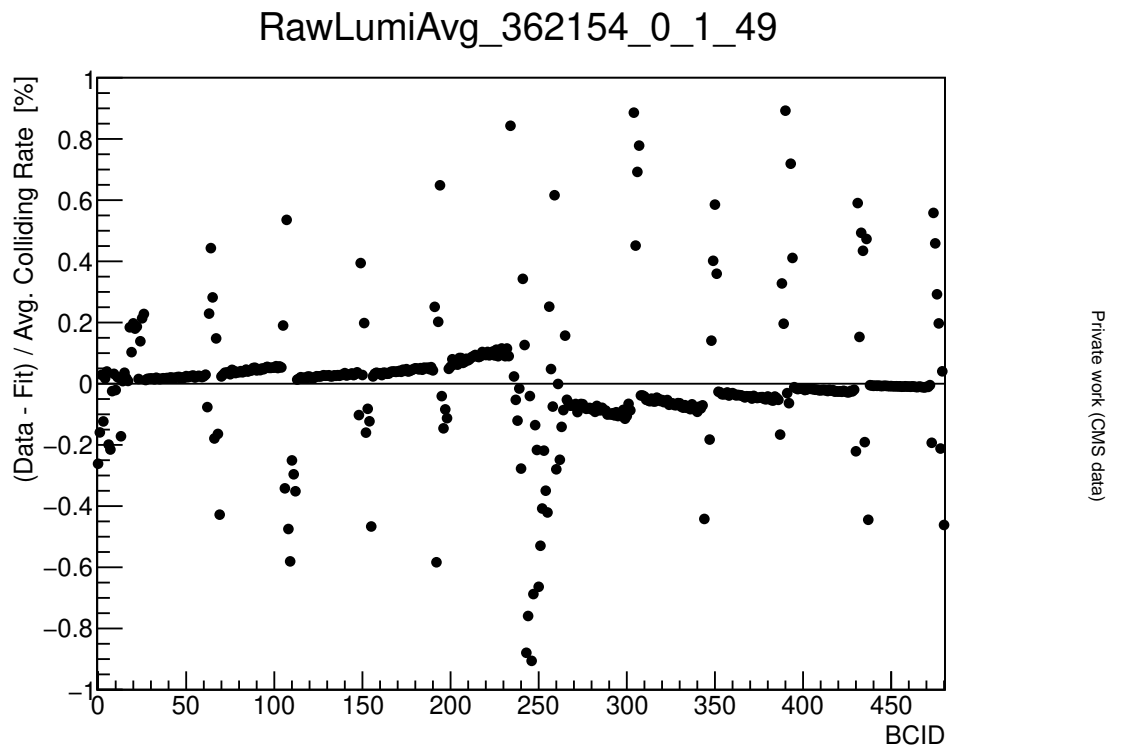


Figura 4.8: Residuos correspondientes al ejemplo representativo del ajuste del modelo de ruido de PCC para la muestra de 480 BCIDs en la corrida 362154 de CMS.

Cuatro trenes (940 BCIDs)

En esta subsección se exponen los resultados de haber realizado el análisis completo para selección de muestra, descrito en la metodología, pero para los primeros cuatro trenes (940 BCIDs) de cada sección de 50 LS que conforma la corrida 362154 de CMS. En primer lugar, se ajustó el conteo de cúmulos de este primer vagón obteniendo un valor de $\alpha = 0,0321$, $A = 0,0013$ y $B = 0,0151$ y se calcularon los residuos del ajuste. Para este caso, las incertidumbres se redujeron en un promedio del 3.0% para los tres parámetros duplicando el número de la muestra⁴. Llegando a una evolución asintótica de la relación entre precisión y tamaño de la muestra, a pesar de haber duplicado éste último. Además, el ajuste ya no converge uniformemente, pues los residuos de los BCIDs colisionantes dejan de ser 0 o prácticamente nulos. Sirvan como ejemplos de un ajuste y del cálculo de sus residuos las figuras 4.9 y 4.10.

- Ajuste y residuos

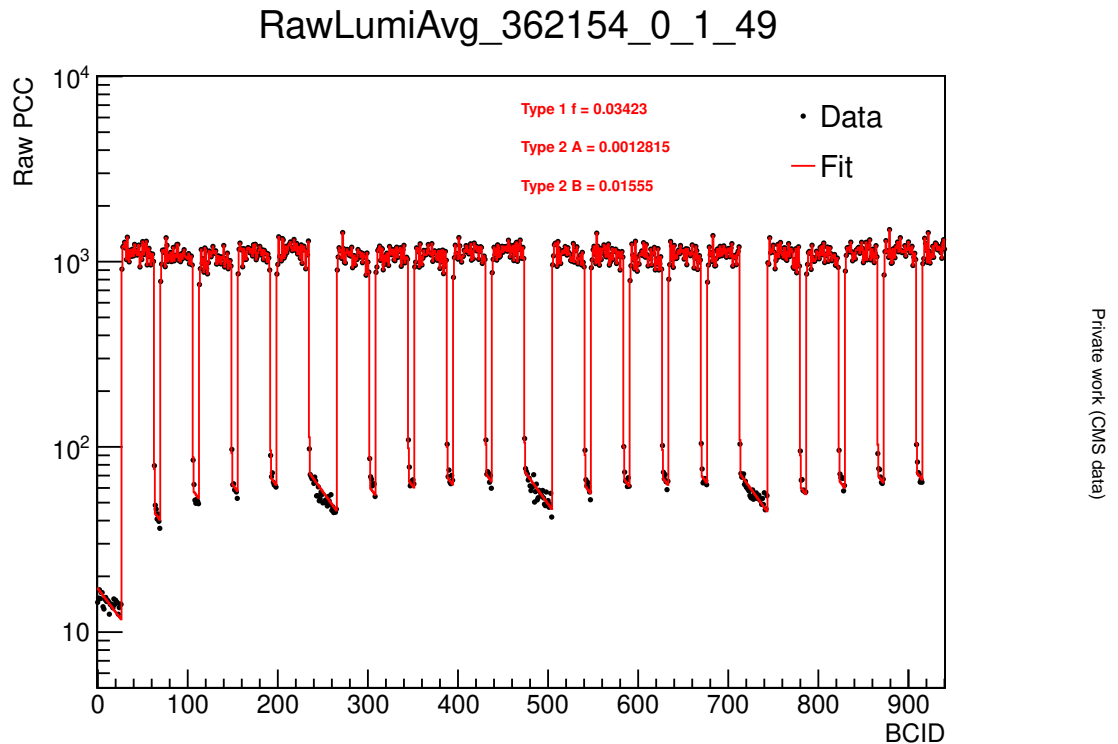


Figura 4.9: Ejemplo representativo del ajuste del modelo de ruido de PCC para la muestra de 940 BCIDs en la corrida 362154 de CMS.

⁴Ver d. Análisis de precisión vs. eficiencia.

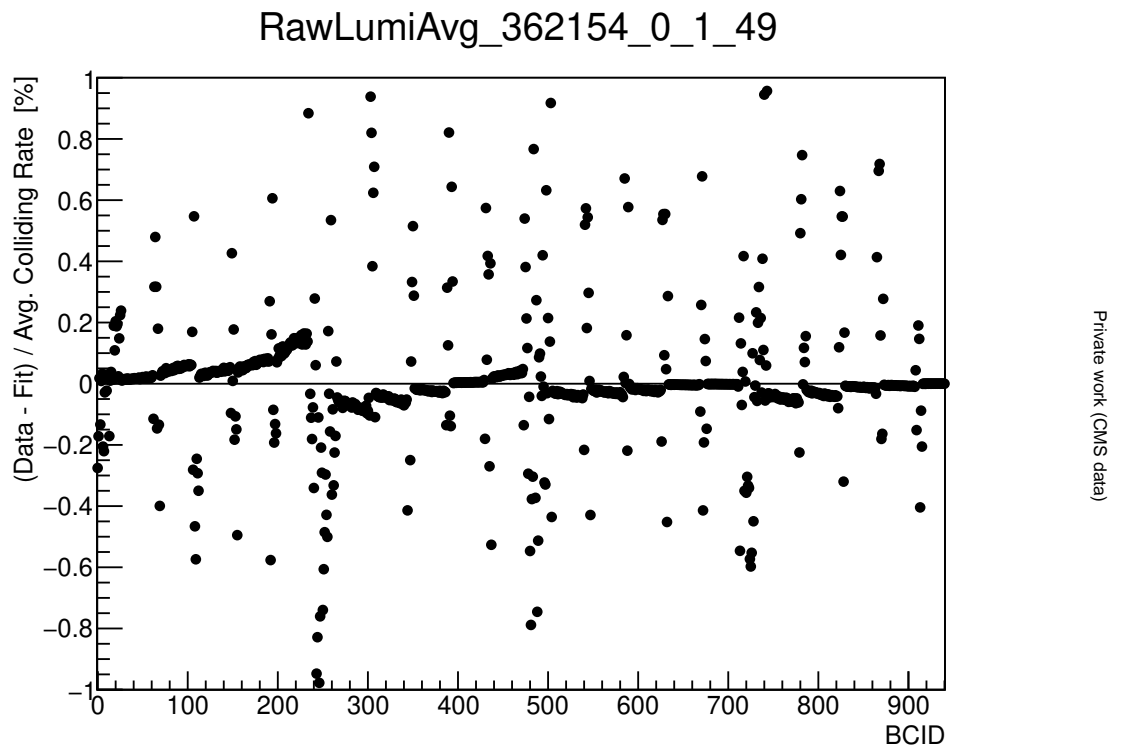


Figura 4.10: Residuos correspondientes al ejemplo representativo del ajuste del modelo de ruido de PCC para la muestra de 940 BCIDs en la corrida 362154 de CMS.

c. Evolución temporal

Una vez obtenidos los ajustes de la subsección anterior, se usaron los valores estimados para cada contribución de ruido de cada sección de 50 LS de la corrida utilizada y se calculó su incertidumbre estadística con $N - 1 = \{59, 259, 479, 939\}$. Luego, se calculó la desviación estándar y la media aritmética de los errores estadísticos de cada uno de los 16 puntos para cada caso, junto al promedio de las estimaciones de cada contribución de ruido, pesadas por el inverso del error de cada punto. Finalmente, se reportó esta información en la siguiente subsección⁵, junto a las gráficas que a continuación se muestran, para poder llevar a cabo un análisis visual y analítico de la precisión que ofrece cada muestra en función de su tamaño. En general, se observó que al incrementar el número de BCIDs utilizados en el ajuste disminuye la dispersión estadística de los puntos y se reducen las barras de error. Sin embargo, esta mejora deja de ser marcada al pasar de 480 a 940 BCIDs, lo que sugiere la presencia de un rendimiento asintótico en términos de precisión, como se muestra a continuación.

Tipo 1: fracción (α)

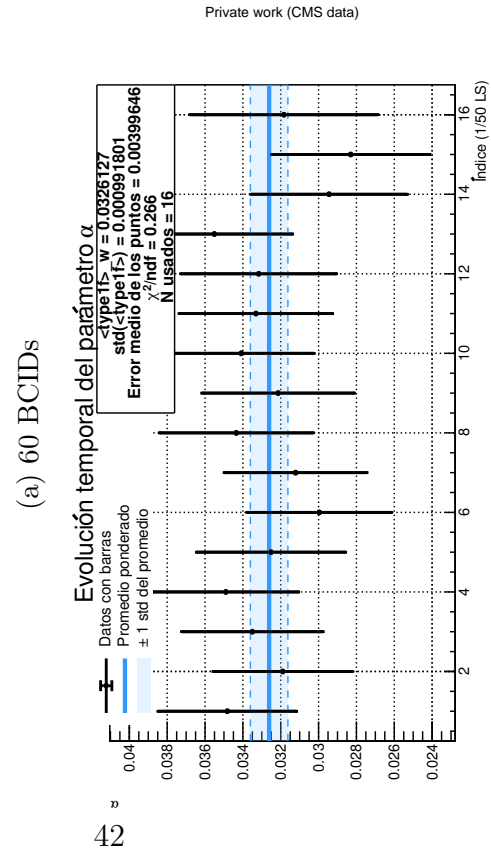
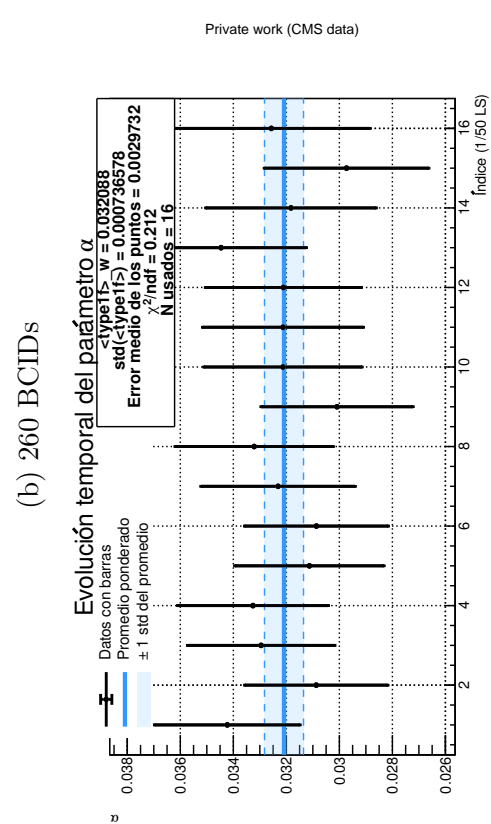
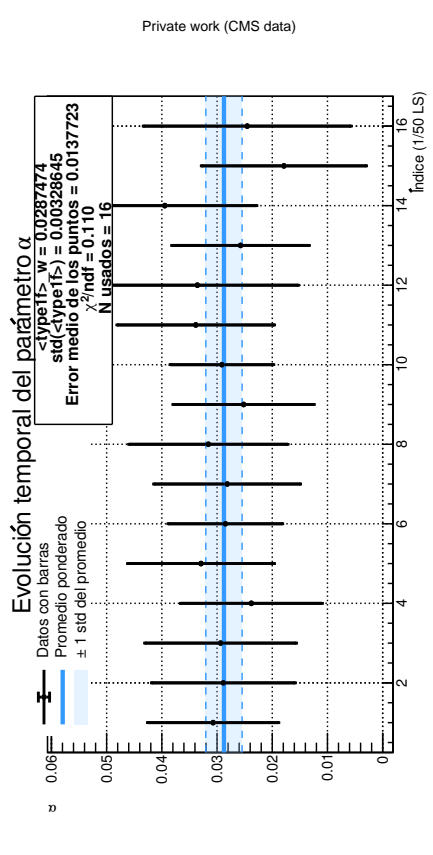
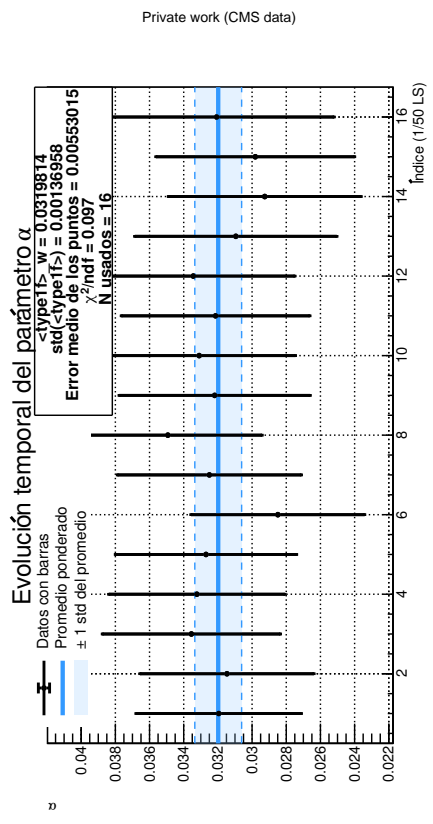
El procesamiento y visualización de los datos anteriormente mencionados permiten inferir que, al comparar visualmente los cuatro paneles, se observa que el comportamiento general de las series es compatible con fluctuaciones alrededor de un valor medio aproximadamente constante, sin una tendencia temporal monótona evidente dentro de la corrida 362154 de CMS. Sin embargo, la calidad estadística de éste comportamiento depende claramente del número de BCIDs incluidos en el ajuste.

Para la muestra de 60 BCIDs, la dispersión de los puntos y el tamaño de las barras de error son considerables, lo que limita la sensibilidad del análisis para distinguir entre fluctuaciones estadísticas y posibles variaciones temporales pequeñas. Al aumentar la muestra a 260 BCIDs, la reducción en las incertidumbres es clara y la serie temporal se torna más estable. Esta mejora continúa al pasar a 480 BCIDs, donde los puntos se dispersan menos alrededor del valor medio y la estimación de α resulta visualmente más robusta. En contraste, al incrementar la muestra hasta 940 BCIDs, la mejora adicional es menor, lo que sugiere que el beneficio estadístico se satura.

Este comportamiento es consistente con los resultados cuantitativos del análisis de precisión⁶, donde el error porcentual promedio para α disminuye de 48% a 17%, 12% y 9% al pasar de 60 a 260, 480 y 940 BCIDs, respectivamente. En consecuencia, para el parámetro α la configuración de 480 BCIDs ya ofrece una representación temporal suficientemente estable y eficiente en comparación con el aumento a 940 BCIDs.

⁵Ver d. Análisis de precisión vs. eficiencia.

⁶Ver d. Análisis de precisión vs. eficiencia.



(a) 60 BCIDs

(b) 260 BCIDs

(c) 480 BCIDs

(d) 940 BCIDs

Figura 4.11: Evolucion temporal del parametro α para distintas configuraciones de BCIDs por bloque de 50 lumisections en la corrida 362154 de CMS: (a) 60 BCIDs, (b) 260 BCIDs, (c) 480 BCIDs y (d) 940 BCIDs.

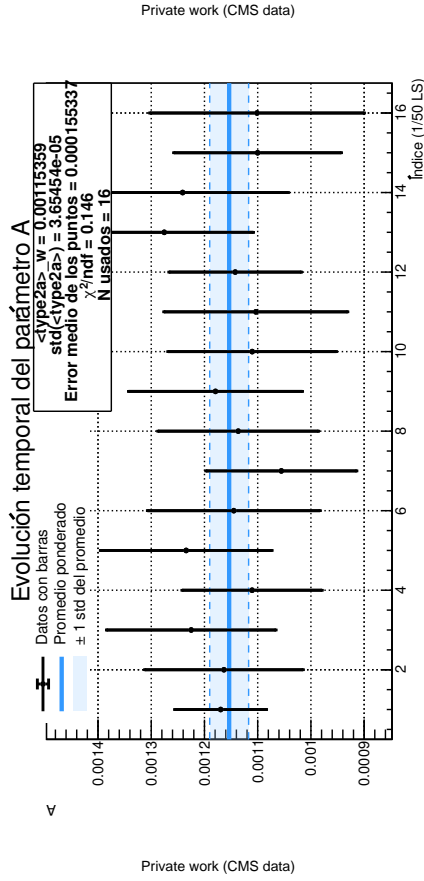
Tipo 2: norma (A)

La Figura 4.12 muestra la evolución temporal del parámetro A para las distintas configuraciones de BCIDs consideradas en este trabajo. En contraste con α , el parámetro A corresponde a la amplitud de la contribución exponencial del ruido de tipo 2, por lo que su determinación suele ser más sensible al tamaño efectivo de la muestra utilizada en el ajuste. Esta característica se refleja claramente en la comparación de los cuatro paneles, donde la calidad visual de la serie temporal cambia de manera notable entre la configuración mínima de 60 BCIDs y las configuraciones de mayor tamaño.

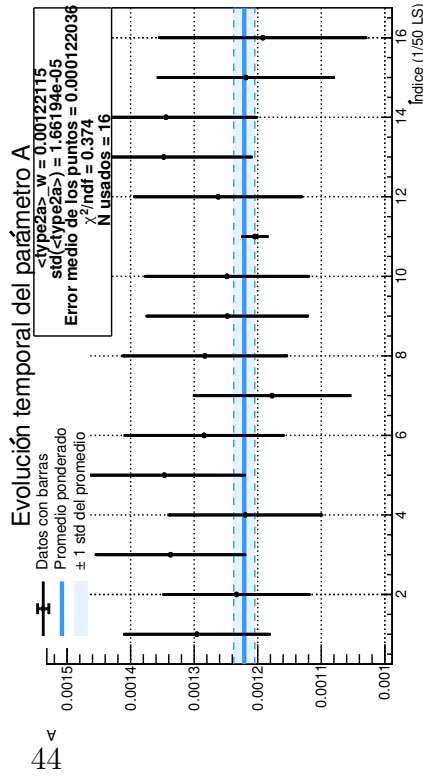
En el caso de 60 BCIDs, la serie temporal de A presenta la dispersión relativa más grande de todas las configuraciones analizadas. Las barras de error son amplias en comparación con el valor medio del parámetro, lo que dificulta distinguir si las fluctuaciones observadas corresponden únicamente a efectos estadísticos o si podrían ocultar una estructura temporal más compleja. Este comportamiento concuerda con la tabla de precisión correspondiente, en la que el error porcentual promedio para A alcanza 117 %, es decir, un valor incluso mayor que la propia estimación media. Por ello, la muestra de 60 BCIDs resulta claramente insuficiente para un estudio robusto de estabilidad temporal de este parámetro.

Al aumentar la muestra a 260 BCIDs, la situación mejora de forma drástica. La dispersión de los puntos disminuye notablemente y las incertidumbres se reducen hasta un error porcentual promedio de 13 %, lo que transforma a la serie en una representación temporal mucho más interpretable. Este cambio confirma que el parámetro A requiere un tamaño de muestra mayor para ser estimado con estabilidad razonable. La configuración de 480 BCIDs profundiza esta mejora y reduce el error porcentual promedio a 10 %, dando lugar a una serie temporal más compacta alrededor del valor medio. En esta escala, la descripción temporal de A ya resulta suficientemente estable para los fines del análisis global.

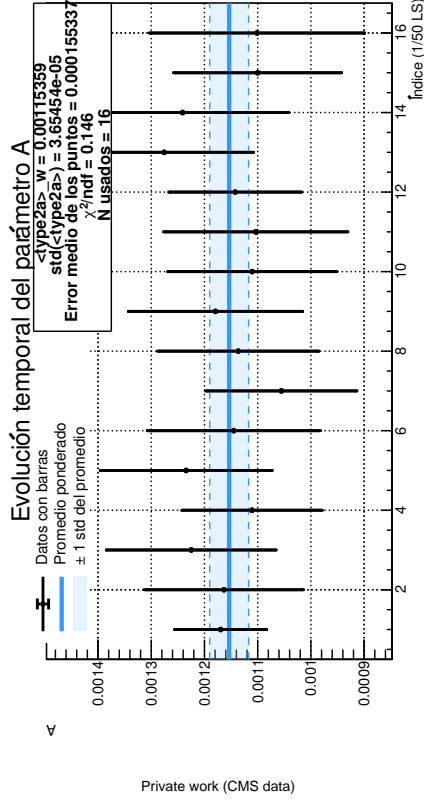
Finalmente, aunque la configuración de 940 BCIDs todavía ofrece una reducción adicional de la incertidumbre, llevándola a un error porcentual promedio de 7 %, la ganancia con respecto a 480 BCIDs ya no es tan grande como la observada al pasar de 60 a 260 BCIDs. En otras palabras, el comportamiento de A muestra con especial claridad un régimen de rendimientos decrecientes: una vez alcanzados 480 BCIDs, aumentar la muestra continúa mejorando la precisión, pero no en una proporción que justifique por sí sola el costo computacional adicional. Por ello, el análisis del parámetro A también favorece la selección de 480 BCIDs como una configuración suficientemente robusta y eficiente para el estudio posterior.



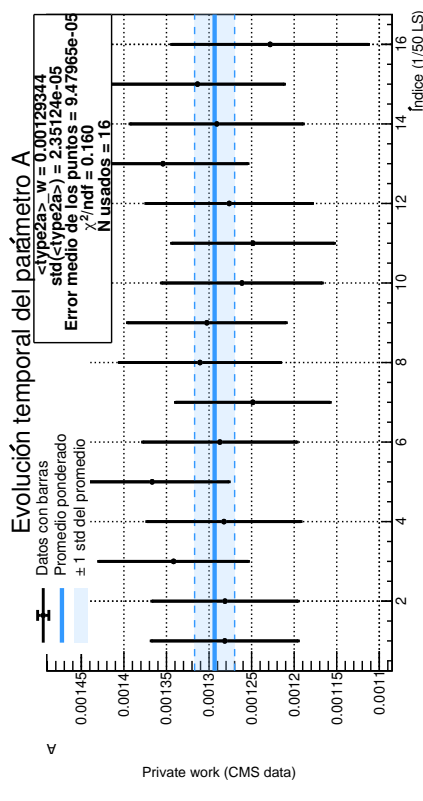
(a) 60 BCIDs



(b) 260 BCIDs



(c) 480 BCIDs



(d) 940 BCIDs

Figura 4.12: Evolución temporal del parámetro A para distintas configuraciones de BCIDs por bloque de 50 lumisections en la corrida 362154 de CMS: (a) 60 BCIDs, (b) 260 BCIDs, (c) 480 BCIDs y (d) 940 BCIDs.

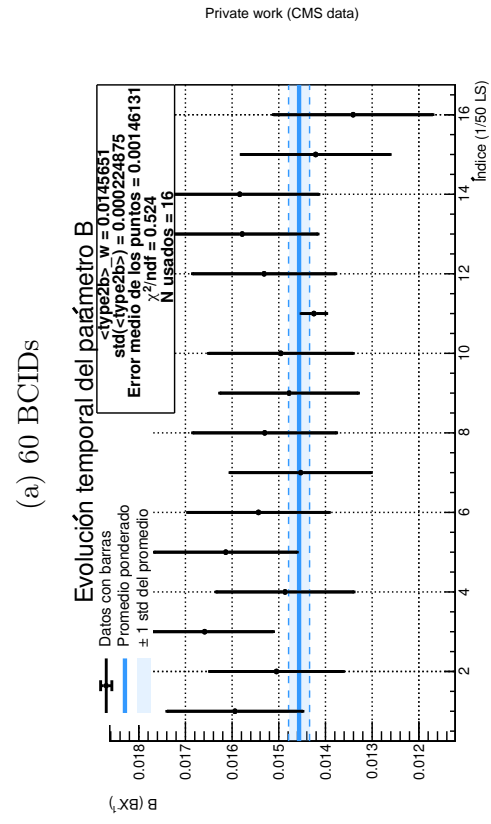
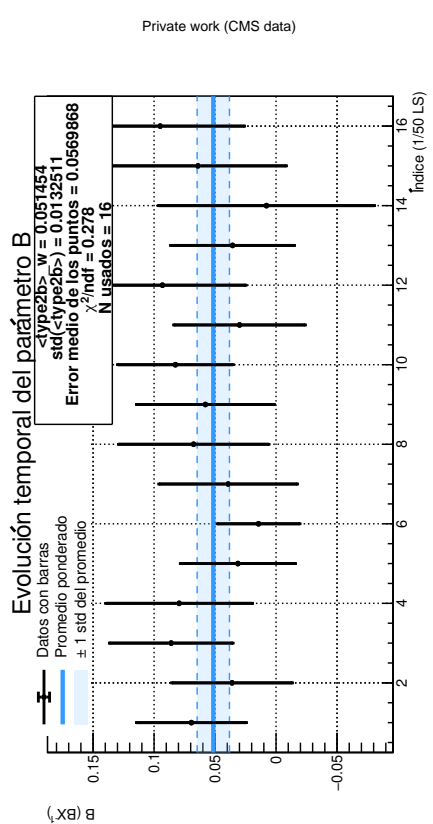
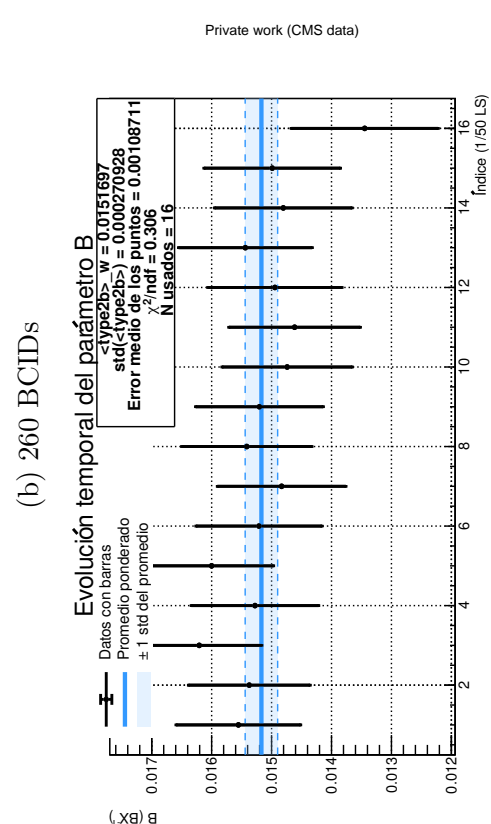
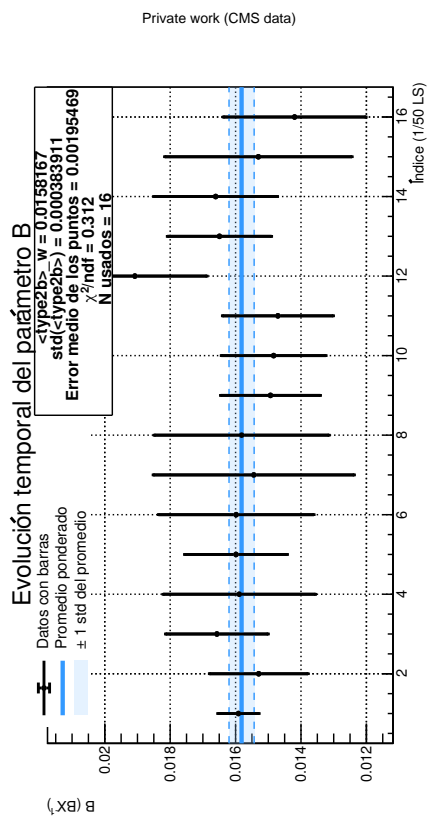
Tipo 2: constante de tiempo (B)

Para el caso de la constante de tiempo para la contribución de ruido de tipo 2, la Figura 4.13 presenta la evolución temporal del parámetro B para las cuatro configuraciones de muestra estudiadas. Este parámetro controla la escala de decaimiento de la componente exponencial asociada al ruido de tipo 2, por lo que su estimación depende no sólo de la presencia de suficiente información estadística, sino también de que la muestra incluya una extensión adecuada de BCIDs para capturar de manera efectiva la forma del decaimiento. Por esta razón, la comparación entre configuraciones resulta particularmente informativa para valorar qué tan sensible es la determinación de B al tamaño de muestra.

La muestra de 60 BCIDs produce una serie temporal con dispersión amplia y barras de error grandes en relación con el valor medio del parámetro. De hecho, el error porcentual promedio en esta configuración alcanza 109 %, lo que indica que la incertidumbre estadística es del mismo orden que la propia estimación. En estas condiciones, la serie temporal de B sólo permite una apreciación cualitativa muy limitada de su comportamiento y no constituye una base suficientemente sólida para un estudio de estabilidad. Esto confirma que el rango mínimo de 60 BCIDs no contiene información bastante para caracterizar de forma precisa la constante de decaimiento del ruido exponencial.

El paso a 260 BCIDs mejora sustancialmente esta situación. La reducción de la dispersión es evidente y el error porcentual promedio cae hasta 12 %, lo que representa una ganancia estadística muy importante respecto al caso anterior. En la configuración de 480 BCIDs, la serie temporal de B se vuelve todavía más compacta y el error porcentual promedio disminuye a 10 %, con una apariencia visual ya bastante estable a lo largo de toda la corrida. En este punto, la estimación del parámetro muestra un balance convincente entre precisión y costo de cómputo.

Al aumentar finalmente a 940 BCIDs, se obtiene una mejora adicional hasta un error porcentual promedio de 7 %. Sin embargo, al igual que en los parámetros anteriores, esta ganancia es mucho menor que la obtenida en las transiciones iniciales. La comparación visual entre 480 y 940 BCIDs revela que ambas configuraciones ofrecen series temporalmente estables y con incertidumbres relativamente pequeñas, pero que la diferencia entre ellas ya no es lo suficientemente marcada como para justificar, por sí sola, el incremento fuerte en el tiempo de ejecución. En consecuencia, el comportamiento de B refuerza la misma conclusión alcanzada para α y A : la configuración de 480 BCIDs constituye una opción adecuada para realizar el análisis global sin sacrificar de manera importante la calidad estadística de la estimación.



(a) 60 BCIDs

(b) 260 BCIDs

(c) 480 BCIDs

(d) 940 BCIDs

Figura 4.13: Evolución temporal del parámetro B para distintas configuraciones de BCIDs por bloque de 50 lumisections en la corrida 362154 de CMS: (a) 60 BCIDs, (b) 260 BCIDs, (c) 480 BCIDs y (d) 940 BCIDs.

d. Análisis de precisión vs. eficiencia.

Para cuantificar la conveniencia de cada configuración, se compararon el valor promedio estimado, el error promedio absoluto y el error porcentual promedio de los parámetros α , A y B , junto con el tamaño de la muestra. Los resultados muestran que el aumento en el número de BCIDs reduce sistemáticamente los errores estadísticos, pero el costo computacional crece de manera no lineal. En particular, la transición de 480 a 940 BCIDs ofrece una mejora relativamente pequeña en precisión, mientras que la eficiencia del ajuste disminuye de forma desproporcionada. Por esta razón, 480 BCIDs se identificó como la configuración más eficiente para el análisis global como se puede apreciar a continuación en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3.

Tipo 1: fracción (α)

N BCIDs	Estimación promedio	Error promedio absoluto	Error porcentual promedio
1 Vagón (60)	0.0287474	0.0137723	48
1 Tren (260)	0.0319814	0.00553015	17
2 Trenes (480)	0.0326127	0.00399646	12
4 Trenes (940)	0.032088	0.0029732	9

Cuadro 4.1: Cuadro comparativo del número de BCIDs utilizados en el ajuste vs. la estimación promedio, error promedio absoluto y el error porcentual promedio producido para un ajuste con ese número de BCIDs para el parámetro α .

Tipo 2: norma (A)

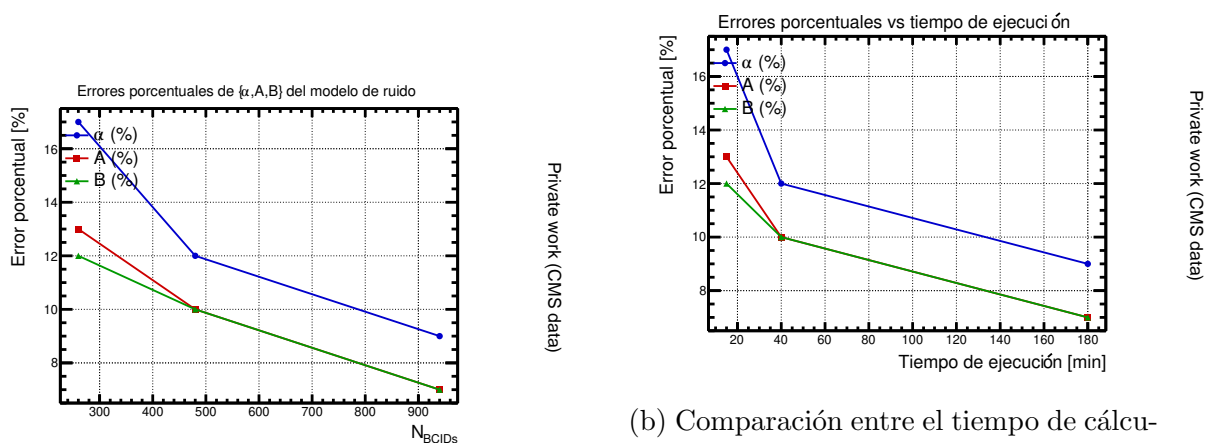
N BCIDs	Estimación promedio	Error promedio absoluto	Error porcentual promedio
1 Vagón (60)	0.00170325	0.00192401	117
1 Tren (260)	0.00115359	0.000155337	13
2 Trenes (480)	0.00122115	0.000122036	10
4 Trenes (940)	0.00129344	9.47965e-05	7

Cuadro 4.2: Cuadro comparativo del número de BCIDs utilizados en el ajuste vs. la estimación promedio, error promedio absoluto y el error porcentual promedio producido para un ajuste con ese número de BCIDs para el parámetro A .

Tipo 2: constante de tiempo (B)

N BCIDs	Estimación promedio	Error promedio absoluto	Error porcentual promedio
1 Vagón (60)	0.051454	0.0569868	109
1 Tren (260)	0.0158167	0.00195469	12
2 Trenes (480)	0.0145651	0.00146131	10
4 Trenes (940)	0.0151697	0.00108711	7

Cuadro 4.3: Cuadro comparativo del número de BCIDs utilizados en el ajuste vs. la estimación promedio, error promedio absoluto y el error porcentual promedio producido para un ajuste con ese número de BCIDs para el parámetro B .



(a) Gráfica del Error porcentual promedio del ajuste de cada uno de los tres parámetros de ruido en función de la cantidad de BCIDs utilizados para calcularlos.

(b) Comparación entre el tiempo de cálculo requerido para realizar el cálculo del promedio de cada uno de los parámetros de ruido y su Error porcentual promedio. En esta gráfica también se observa claramente que el costo computacional se duplica cuando se duplica la cantidad de trenes utilizados, de dos a cuatro.

Figura 4.14: Gráficas de los resultados del análisis comparativo entre precisión y costo computacional realizado y descrito en IV. Selección de una muestra.

Así pues, a partir de estos resultados, se concluyó que la muestra más eficiente y efectiva para realizar el análisis de afterglow para un año completo, es utilizar 2 trenes o 480 BCIDs de cada bloque de 50 Lumisections. Esta decisión fue tomada utilizando el criterio del codo para la selección de hiperparámetros en algoritmos de agrupamiento [40], el cual establece que el valor óptimo de un hiperparámetro es aquél que se encuentra en el codo de la gráfica de error vs. valor de dicho hiperparámetro. Así pues, como se observa en ambas gráficas de la figura 4.14, el valor que se encuentra en el codo es el correspondiente a 480 BCIDs.

II. Análisis de todo el año

Una vez seleccionada la muestra, se llevó a cabo el mismo análisis expuesto en la sección anterior, pero para todos los primeros 480 BCIDs de cada bloque de 50 lumisections con el mismo patrón de llenado (1623) de todos los fills del año 2022. De esta manera se obtuvieron las series temporales globales de α , A y B para el periodo estudiado. Los valores promedio encontrados fueron $\alpha = 0,0324316$, $A = 0,0011716$ y $B = 0,0143212$ como se expone en las tablas 4.4, 4.5 y 4.6. Visualmente, las tres series muestran fluctuaciones alrededor de un valor central sin una tendencia monótona evidente a lo largo del año. La dispersión relativa es distinta en cada caso, siendo el parámetro A el que presenta mayor variación relativa como se muestra en la figura 4.16, mientras que α y B muestran un comportamiento más estable según se puede apreciar en las figuras 4.15 y 4.17.

a. Tipo 1: fracción (α)

Estimación promedio	Error promedio absoluto	Error porcentual promedio	<i>std</i>
0.032428	0.00453869	14 %	0.000106789

Cuadro 4.4: Resultados del ajuste del parámetro de ruido α para todos los primeros 480 BCIDs de cada bloque de 50 lumisections con el mismo patrón de llenado (1623) de todos los fills del año 2022.

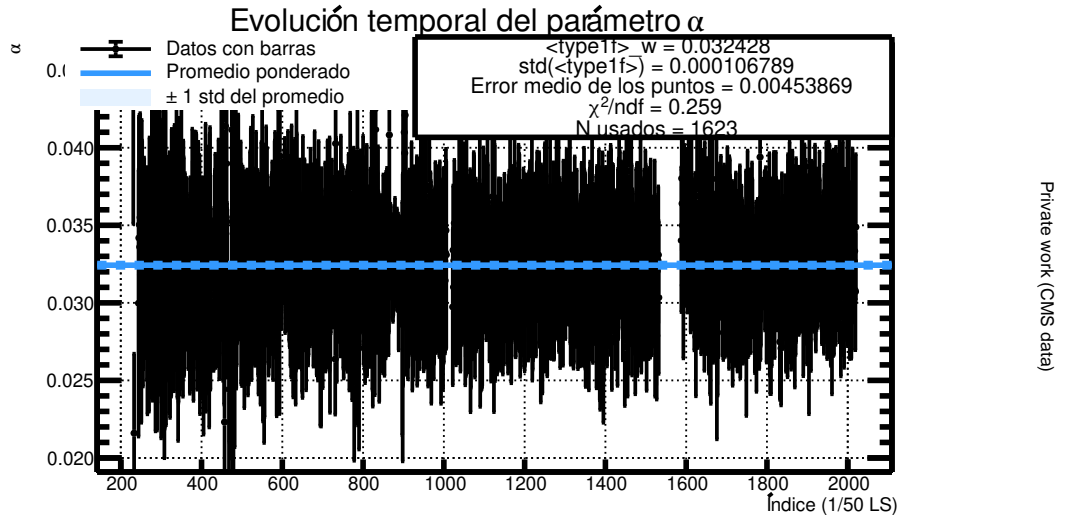


Figura 4.15: Evolución temporal del parámetro de ruido α vs. tiempo en unidades de bloques de 50 lumisections, para todo el año 2022.

b. Tipo 2: norma (A)

Estimación promedio	Error promedio absoluto	Error porcentual promedio	std
0.00117167	0.000116927	9.97 %	1.48199×10^{-06}

Cuadro 4.5: Resultados del ajuste del parámetro de ruido A para todos los primeros 480 BCIDs de cada bloque de 50 lumisections con el mismo patrón de llenado (1623) de todos los fills del año 2022.

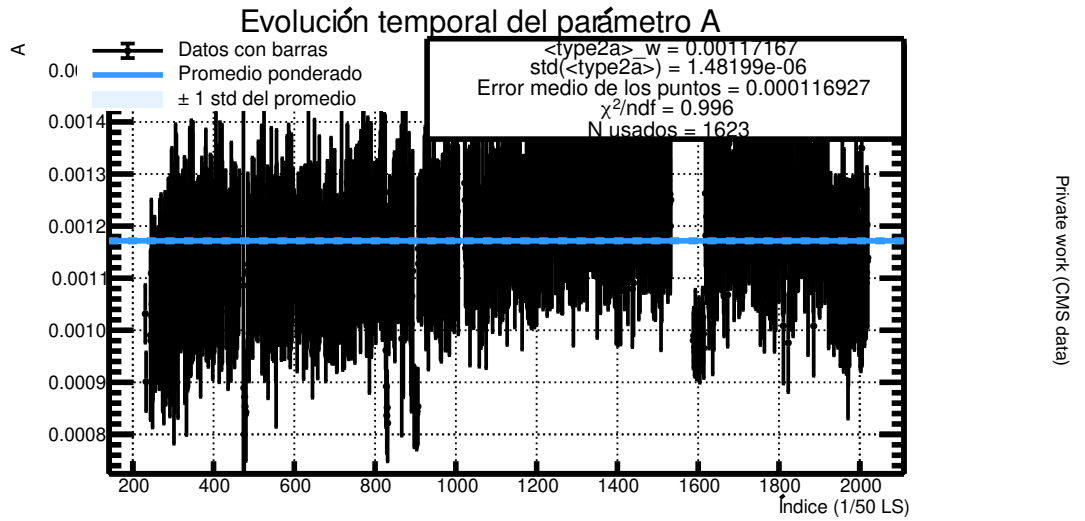


Figura 4.16: Evolución temporal del parámetro de ruido A vs. tiempo en unidades de bloques de 50 lumisections, para todo el año 2022.

c. Tipo 2: constante de tiempo (B)

Estimación promedio	Error promedio absoluto	Error porcentual promedio	std
0.0143224	0.00146837	10.25 %	2.0461×10^{-05}

Cuadro 4.6: Resultados del ajuste del parámetro de ruido B para todos los primeros 480 BCIDs de cada bloque de 50 lumisections con el mismo patrón de llenado (1623) de todos los fills del año 2022.

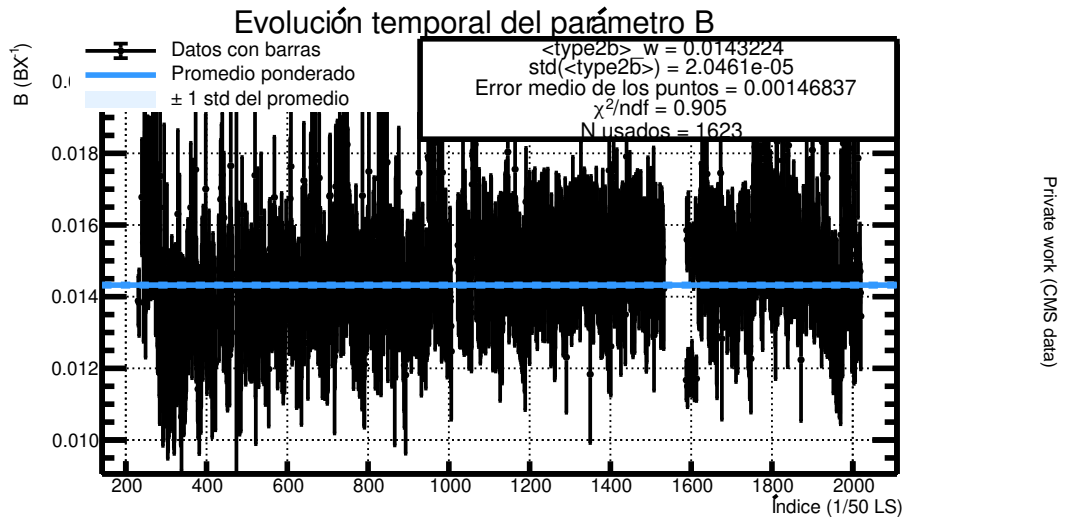


Figura 4.17: Evolución temporal del parámetro de ruido B vs. tiempo en unidades de bloques de 50 lumisections, para todo el año 2022.

Aunque la inspección visual de la gráfica de α no sugiere deriva temporal, y a pesar de que para A y B sí se logra apreciar cierta tendencia lineal en el tiempo, por lo menos, en las primeras dos terceras partes de los datos; estas observaciones por sí solas no son suficientes para aceptar la hipótesis de estabilidad; por ello, en la siguiente sección se aplica una prueba estadística formal.

d. Primera prueba de hipótesis: ajuste a constante en la serie anual completa

Para evaluar formalmente la hipótesis de estabilidad temporal a escala anual global, se ajustó un modelo constante a cada una de las series temporales completas de α , A y B según lo expuesto en la metodología⁷. Bajo la hipótesis nula⁸, cada parámetro debe ser compatible con un valor constante dentro de sus incertidumbres experimentales. Los resultados del ajuste muestran valores de χ^2/ndf razonables y p -valores compatibles con la hipótesis nula para los tres parámetros⁹. En particular, no se encontró evidencia estadísticamente significativa de deriva temporal en α , A ni B durante el periodo estudiado. Por lo tanto, dentro del alcance de este análisis global anual, los datos son consistentes con una descripción efectiva en la que dichos parámetros pueden tratarse como constantes en el tiempo.

Parámetro	p -valor	χ^2/ndf
α	0.9999	0.259
A	0.5554	0.996
B	0.9956	0.905

Cuadro 4.7: Resultados de la primera prueba de hipótesis, basada en el ajuste a constante de la serie anual completa. El p -valor se calcula con respecto a la hipótesis nula descrita en la subsección a. Planteamiento de la hipótesis.

No obstante, esta conclusión debe interpretarse con cautela. La compatibilidad con un comportamiento constante a escala anual global no implica necesariamente que los parámetros sean estrictamente estáticos en todo subperiodo del año, sino únicamente que, al combinar todos los datos de 2022 en una sola serie, las posibles variaciones temporales quedan promediadas o compensadas. De hecho, la inspección visual de las Figuras 4.15, 4.16 y 4.17 sugiere la presencia de una brecha temporal y de un posible cambio de régimen, lo que motiva un análisis complementario más localizado.

En conjunto, los resultados de esta primera prueba muestran que el procedimiento de ajuste implementado permite estimar de forma consistente los parámetros del modelo de ruido en PCC y estudiar su comportamiento temporal. La comparación entre tamaños de muestra permitió seleccionar una configuración eficiente para el análisis anual, mientras que la prueba estadística global indicó compatibilidad con un comportamiento constante en 2022. Sin embargo, esta compatibilidad con un comportamiento constante a escala anual global no excluye la posibilidad de que existan tendencias sistemáticas al restringir el análisis a subperiodos más homogéneos desde el punto de vista operativo. Por ello, en la siguiente subsección se estudia de manera complementaria la comparación entre un modelo constante y un modelo lineal en el régimen previo a la brecha observada en las series temporales.

⁷Ver IV. Prueba principal: ajuste a constante mediante χ^2 .

⁸Ver a. Planteamiento de la hipótesis.

⁹Ver IV. Criterio de aceptación de la hipótesis de estabilidad.

e. Análisis complementario: comparación entre un modelo constante y un modelo lineal en el régimen pre-gap

Aunque la primera prueba de hipótesis mostró compatibilidad con un comportamiento constante a escala anual global, la inspección visual de las series temporales reveló una estructura más fina. En particular, en los parámetros A y B se observa una tendencia aproximadamente lineal creciente en la primera parte del año, seguida por una brecha alrededor del índice 1538 y, posteriormente, por un cambio de comportamiento. Esta brecha se asocia al paro técnico anual del LHC, por lo que marca una separación natural entre dos regímenes operativos distintos.

Con base en esta observación, se realizó un análisis complementario restringido a los datos previos a la brecha, es decir, al régimen pre-gap. El objetivo de este contraste fue determinar si, dentro de ese intervalo operacionalmente homogéneo, los parámetros permanecen compatibles con un modelo constante o si un modelo lineal describe significativamente mejor los datos. Para ello, se ajustaron a las series de α , A y B dos modelos anidados, $H_0 : y = b$ y $H_1 : y = mx + b$, tal como se describe en la metodología¹⁰.

Los resultados se resumen en el Cuadro 4.8. Para α , el ajuste constante y el lineal presentan calidades de ajuste prácticamente indistinguibles, con $\chi_{H_0}^2 = 306,9$ y $\chi_{H_1}^2 = 306,8$, por lo que la mejora asociada al modelo lineal es mínima: $\Delta\chi^2 = 0,147$ con $\Delta ndf = 1$, lo que corresponde a $p_{\text{final}} = 0,702$. En consecuencia, no existe evidencia estadísticamente significativa para preferir el modelo lineal sobre el constante en el régimen pre-gap, y el parámetro α permanece compatible con ausencia de deriva temporal lineal.

En contraste, para A se obtuvo $\chi_{H_0}^2 = 1042,9$ y $\chi_{H_1}^2 = 890,0$, de modo que la mejora del modelo lineal es $\Delta\chi^2 = 153$ con $\Delta ndf = 1$, lo que produce $p_{\text{final}} = 3,903 \times 10^{-35}$. De manera análoga, para B se obtuvo $\chi_{H_0}^2 = 840,8$ y $\chi_{H_1}^2 = 791,4$, con $\Delta\chi^2 = 49,4$ y $p_{\text{final}} = 2,102 \times 10^{-12}$. En ambos casos, la mejora del modelo lineal sobre el constante es estadísticamente significativa, por lo que en el régimen pre-gap se concluye que A y B presentan deriva temporal lineal creciente antes del paro técnico anual del LHC.

La comparación formal entre modelos anidados mediante $\Delta\chi^2$ muestra que, en el régimen pre-gap, el modelo lineal describe significativamente mejor los datos que el modelo constante para los parámetros A y B . Por esta razón, la evidencia de deriva temporal lineal en estos dos parámetros se sustenta en la mejora relativa cuantificada por $\Delta\chi^2$ y p_{final} .

¹⁰Ver IV. Prueba complementaria: comparación entre un modelo constante y un modelo lineal en el régimen pre-gap.

Parámetro	m_{H_0}	$\chi^2_{H_0}$	ndf_{H_0}	m_{H_1}	$\chi^2_{H_1}$	ndf_{H_1}	$\Delta\chi^2$	Δndf	p_{final}
α	0	306.9	1220	1.36367×10^{-7}	306.8	1219	0.147	1	0.702
A	0	1042.9	1219	6.22702×10^{-8}	890.0	1218	153	1	3.903×10^{-35}
B	0	840.8	1219	4.77284×10^{-7}	791.4	1218	49.4	1	2.102×10^{-12}

Cuadro 4.8: Resultados del análisis complementario en el régimen pre-gap. Para cada parámetro se reportan los ajustes bajo $H_0 : y = b$ y $H_1 : y = mx + b$, así como sus respectivos χ^2 , grados de libertad y la comparación formal entre ambos modelos mediante $\Delta\chi^2$ y p_{final} .

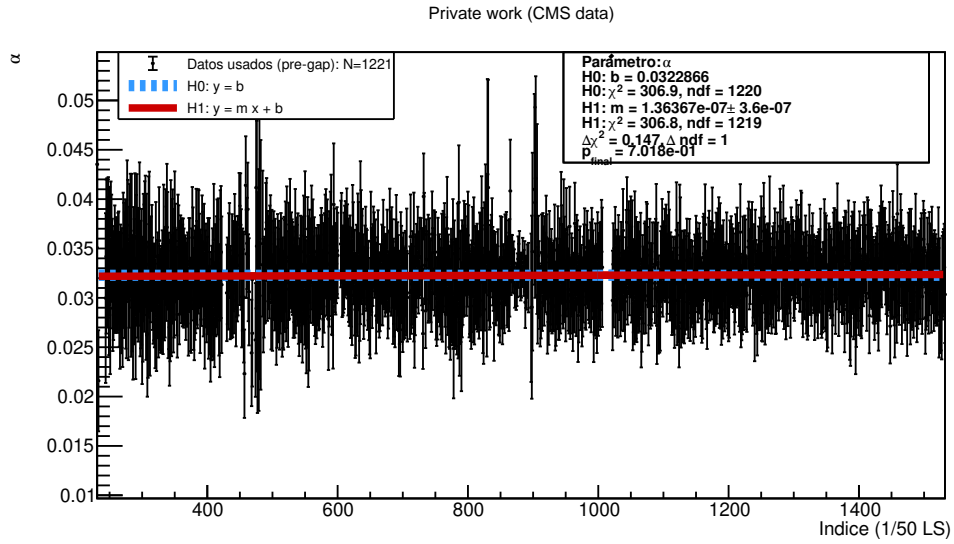


Figura 4.18: Comparación entre un ajuste a constante ($H_0 : y = b$) y un ajuste lineal ($H_1 : y = mx + b$) para el parámetro α en el régimen pre-gap.

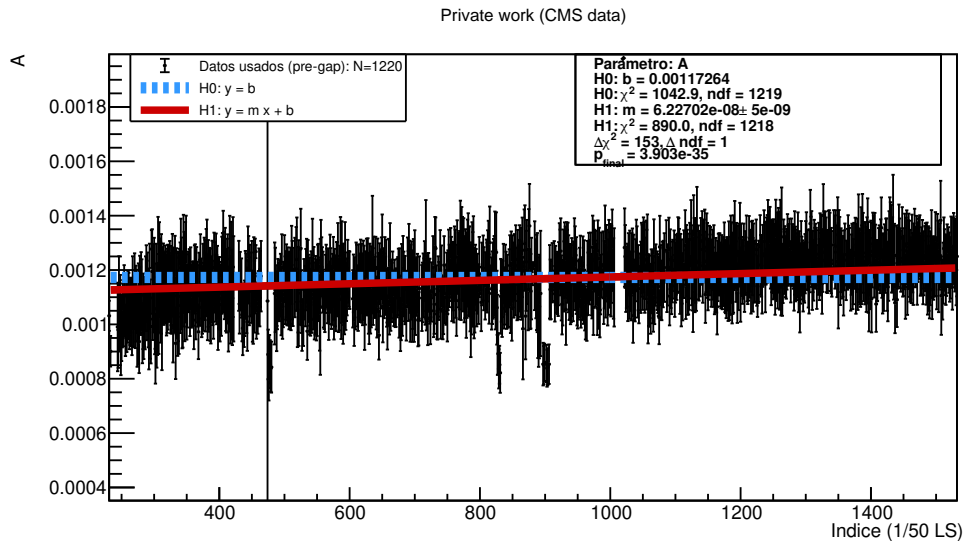


Figura 4.19: Comparación entre un ajuste a constante ($H_0 : y = b$) y un ajuste lineal ($H_1 : y = mx + b$) para el parámetro A en el régimen pre-gap.

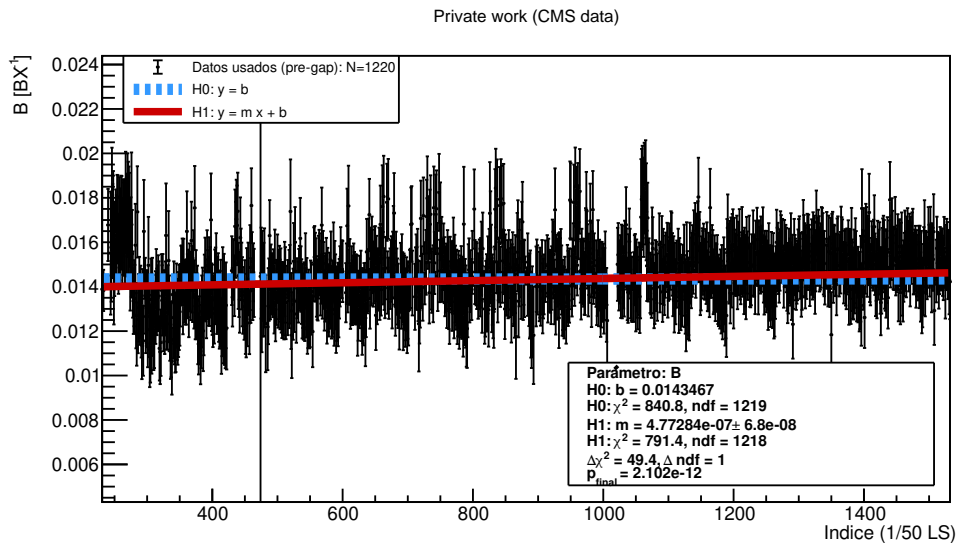


Figura 4.20: Comparación entre un ajuste a constante ($H_0 : y = b$) y un ajuste lineal ($H_1 : y = mx + b$) para el parámetro B en el régimen pre-gap.

Con estos resultados, se concluye que el parámetro α permanece compatible con una descripción constante tanto a escala anual global como en el régimen pre-gap, mientras que los parámetros relacionados con el ruido tipo 2 presentan una mejora significativa al pasar de un modelo constante a uno lineal dentro de dicho régimen. En consecuencia, A y B exhiben deriva temporal lineal creciente mientras las condiciones operativas del LHC permanecen esencialmente inalteradas.

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo se estudió el comportamiento temporal de los parámetros α , A y B del modelo de ruido utilizado en el método de Pixel Cluster Counting (PCC) para la medición de luminosidad en CMS, a partir de datos tomados durante 2022. Para ello, se implementó y adaptó un procedimiento de ajuste capaz de analizar rangos arbitrarios de BCIDs, calcular residuos y propagar incertidumbres, lo que permitió construir una estrategia de análisis consistente para seguir la evolución temporal de los parámetros del modelo. En este sentido, uno de los primeros aportes del trabajo fue disponer de una herramienta funcional para estimar de manera sistemática las contribuciones de ruido en distintas configuraciones de muestra.

La comparación entre muestras de 60, 260, 480 y 940 BCIDs por bloque de 50 luminisecciones mostró que el incremento en el número de BCIDs mejora la precisión estadística de los ajustes, pero con un costo computacional crecientemente alto. A partir de esta comparación se identificó que la muestra de 480 BCIDs constituye el mejor compromiso entre precisión y eficiencia de cómputo. Esta configuración reduce de forma importante los errores respecto a las muestras más pequeñas, mientras evita el aumento desproporcionado en tiempo de ejecución observado al pasar a 940 BCIDs. Por ello, 480 BCIDs se adoptó como muestra de trabajo para el análisis global del año 2022.

Con esta selección se analizaron todos los fills de 2022 con el mismo patrón de llenado (1623). A partir de las series temporales obtenidas se realizaron dos contrastes estadísticos complementarios. El primero consistió en una prueba global anual basada en un ajuste a constante. Esta prueba produjo p -valores compatibles con la hipótesis nula para α , A y B , por lo que, al considerar el conjunto completo del año como una sola muestra, el modelo de ruido puede describirse como efectivamente estacionario.

Sin embargo, el análisis visual de las series temporales mostró la presencia de una brecha asociada al paro técnico anual del LHC, después de la cual cambia el comportamiento de los parámetros. Este hecho motivó un segundo análisis, restringido al régimen pre-gap, es decir, al subconjunto de datos previo a dicha brecha. En este caso se com-

pararon directamente dos modelos anidados para cada parámetro: un modelo constante $H_0 : y = b$ y un modelo lineal $H_1 : y = mx + b$.

Los resultados de este análisis complementario mostraron que para α la mejora del modelo lineal sobre el constante es despreciable, con $\Delta\chi^2 = 0,147$, $\Delta ndf = 1$ y $p_{\text{final}} = 0,702$. En consecuencia, α permanece compatible con ausencia de deriva temporal lineal en el régimen pre-gap. En contraste, para A y B el modelo lineal mejora significativamente al constante: para A se obtuvo $\Delta\chi^2 = 153$ con $p_{\text{final}} = 3,903 \times 10^{-35}$, mientras que para B se obtuvo $\Delta\chi^2 = 49,4$ con $p_{\text{final}} = 2,102 \times 10^{-12}$. Estos resultados constituyen evidencia estadísticamente significativa de deriva temporal lineal creciente en los parámetros asociados al ruido de tipo 2 mientras las condiciones operativas del LHC permanecen esencialmente inalteradas.

En consecuencia, la conclusión principal de esta tesis debe formularse en dos niveles. A escala anual global, el modelo de ruido utilizado en PCC proporciona una descripción efectiva estacionaria de los datos de 2022. No obstante, al estudiar con mayor resolución temporal un subperiodo homogéneo de operación, se observa que dicha estacionariedad no es estricta para todos los parámetros: α se mantiene estable, mientras que A y B evolucionan linealmente en el tiempo. La comparación formal entre modelos anidados muestra que el modelo lineal describe significativamente mejor el régimen pre-gap para los parámetros asociados al ruido de tipo 2. Por tanto, el modelo es adecuado como descripción promedio del año completo, pero no completamente estático cuando se analizan periodos operativos homogéneos con mayor detalle.

En términos de los objetivos planteados, la tesis permitió implementar y adaptar el código de ajuste, comparar configuraciones de muestra, seleccionar una estrategia eficiente de análisis, estimar los parámetros del modelo para el conjunto de fills considerado y evaluar su compatibilidad tanto con un ajuste a constante de la serie anual completa como con una comparación formal entre modelos constante y lineal en un subconjunto físicamente motivado de los datos. Así, el trabajo no sólo permitió caracterizar el comportamiento global del modelo de ruido en 2022, sino también identificar con mayor resolución qué componentes permanecen estables y cuáles muestran evolución temporal.

Finalmente, este resultado abre una línea de trabajo relevante para futuros estudios de luminosidad con PCC. En particular, sería deseable extender este análisis a otros años de toma de datos, distintos patrones de llenado y particiones temporales definidas por cambios operativos del LHC o del detector. También resulta natural explorar esquemas de corrección en los que los parámetros del ruido de tipo 2 sean tratados como cantidades dinámicas dentro de periodos de operación homogéneos. Estos desarrollos permitirían refinar aún más el modelado de las diferentes contribuciones de ruido y mejorar la robustez de la medición de luminosidad con PCC en CMS en escenarios de operación cada vez más exigentes.

Abreviaturas y siglas

- AD: *Antiproton Decelerator* (CERN).
- ALICE: *A Large Ion Collider Experiment*.
- ATLAS: *A Toroidal LHC ApparatuS*.
- BCID: *Bunch Crossing Identifier*.
- BCM1F: *Beam Conditions Monitor 1 – Fast*.
- BPIX: *Barrel Pixel* (barriles del detector de píxeles).
- BRIL: *Beam Radiation, Instrumentation and Luminosity*.
- BX: *Bunch Crossing*.
- CMS: *Compact Muon Solenoid*.
- CSC: *Cathode Strip Chambers*.
- DT: *Drift Tubes*.
- ECAL: *Electromagnetic Calorimeter*.
- FPIX: *Forward Pixel* (discos de extremo del detector de píxeles).
- HCAL: *Hadronic Calorimeter*.
- HFOC/HFET: *Hadron Forward Occupancy / Hadron Forward Transverse Energy*.
- LHC: *Large Hadron Collider*.
- LHCb: *Large Hadron Collider beauty experiment*.
- LEIR: *Low Energy Ion Ring*.
- Linac: *Linear Accelerator*.
- LS: *Lumisection*.
- ndf: *Number of degrees of freedom*.
- PCC: *Pixel Cluster Counting*.
- PD: *Pixel Detector*.
- PLT: *Pixel Luminosity Telescope*.
- PS: *Proton Synchrotron*.

- PSB: *Proton Synchrotron Booster*.
- ROC: *Readout Chip*.
- RPC: *Resistive Plate Chambers*.
- SPS: *Super Proton Synchrotron*.
- TIB: *Tracker Inner Barrel* (barril interno del rastreador de tiras).
- TEC: *Tracker Endcaps* (tapas/discos de extremo del rastreador de tiras).
- TID: *Tracker Inner Disks*.
- TOB: *Tracker Outer Barrel* (barril externo del rastreador de tiras).
- vdM: escaneo de van der Meer (por el apellido de S. van der Meer).

Capítulo 6

Apéndice

A continuación se encuentran todos los detalles técnicos desarrollados en este trabajo.

a. Códigos

En primer lugar, se encuentran los códigos utilizados para realizar los ajustes de los parámetros de ruido por histograma y el código para realizar las gráficas de la evolución temporal de los parámetros de ruido.

Ajustes

Ubicación del código utilizado para realizar los ajustes y guardar sus gráficas y resultados. <https://drive.google.com/drive/folders/1MzHylqW6wJKZhoD9uyttsRkGRFT0p384?usp=sharing>

Gráficas

Ubicación de las gráficas. <https://drive.google.com/drive/folders/1J6qVMI6z7bpv2P3NW3t0GY1sZehu0Q1L?usp=sharing>

b. Tiempo de ejecución de los ajustes

Tiempo de ejecución

<i>N</i> BCIDs	Tiempo de ejecución (mins.)
1 Vagón (60)	2
1 Tren (260)	15
2 Trenes (480)	40
4 Trenes (940)	>180

Cuadro 6.1: Cuadro comparativo del número de BCIDs utilizados en el ajuste vs. el tiempo de ejecución necesario en minutos para un ajuste con ese número de BCIDs.

Bibliografía

- [1] W. Herr and B. Muratori, “Concept of luminosity,” in *CAS - CERN Accelerator School: Intermediate Accelerator Physics*. Geneva: CERN, 2006, pp. 361–378. [En línea]. Disponible en: <https://cds.cern.ch/record/941318>
- [2] “CMS luminosity measurement for the 2017 data-taking period at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” CERN, Geneva, Tech. Rep. CMS-PAS-LUM-17-004, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://cds.cern.ch/record/2621960>
- [3] “CMS luminosity measurement for the 2022 data-taking period at $\sqrt{s}=13.6$ TeV,” CERN, Geneva, Tech. Rep. CMS-PAS-LUM-22-001, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://cds.cern.ch/record/2890833>
- [4] P. Grafström and W. Kozanecki, “Luminosity determination at proton colliders,” *Prog. Part. Nucl. Phys.*, vol. 81, pp. 97–148, 2015.
- [5] V. Papadimitriou, “Luminosity determination at the Tevatron,” Fermilab, Fermilab Conference FERMILAB-CONF-11-253-E, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/1106.5182>
- [6] CMS Collaboration, “Precision luminosity measurement in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV in 2015–2016 at CMS,” *Eur. Phys. J. C*, vol. 81, p. 800, 2021.
- [7] L. Evans and P. Bryant, “LHC Machine,” *JINST*, vol. 3, p. S08001, 2008.
- [8] “The CMS experiment at the CERN LHC,” *JINST*, vol. 3, p. S08004, 2008.
- [9] S. van der Meer, “Calibration of the effective beam height in the ISR,” CERN, Geneva, Tech. Rep. CERN-ISR-PO-68-31, 1968. [En línea]. Disponible en: <https://cds.cern.ch/record/296752>
- [10] O. Karacheban, “Performance of the BRIL luminometers at CMS in Run 2,” in *Proceedings of Science*, ser. EPS-HEP2019, 2020, p. 194. [En línea]. Disponible en: <https://pos.sissa.it/364/194/>
- [11] J. L. Leonard *et al.*, “Fast beam condition monitor for CMS: performance and upgrade,” *Nucl. Instrum. Meth. A*, vol. 738, pp. 235–239, 2014.

- [12] E. Ayala, E. Carrera Jarrin, I. Ahmed, others, and CMS BRIL Collaboration, “The pixel luminosity telescope: a detector for luminosity measurement at CMS using silicon pixel sensors,” *Eur. Phys. J. C*, vol. 83, no. 7, p. 673, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://cds.cern.ch/record/2861814>
- [13] M. Guthoff, others, and CMS Collaboration, “Overview of CMS luminosity determination in run-2,” CERN, CMS Conference Report CMS-CR-2019-250, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://cds.cern.ch/record/2692547>
- [14] “CMS luminosity measurement for the 2018 data-taking period at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” CERN, Geneva, Tech. Rep. CMS-PAS-LUM-18-002, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://cds.cern.ch/record/2676164>
- [15] CMS Collaboration, “Afterglow correction to PCC luminosity measurement,” CERN, CMS Detector Performance Note CMS-DP-2019-016, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://cds.cern.ch/record/2681803>
- [16] —, “CMS luminosity based on pixel cluster counting,” CERN, CMS Physics Analysis Summary CMS-PAS-LUM-12-001, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://cds.cern.ch/record/1482193>
- [17] —, “CMS luminosity based on pixel cluster counting — summer 2013 update,” CERN, CMS Physics Analysis Summary CMS-PAS-LUM-13-001, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://cds.cern.ch/record/1598864>
- [18] A. J. Rádl, “Luminosity calibration at the CMS experiment,” in *Proceedings of Science*, ser. LHCP2023, 2024, p. 283. [En línea]. Disponible en: <https://cds.cern.ch/record/2887084>
- [19] CERN, “The history of CERN,” <https://timeline.web.cern.ch/timeline-header/89>, 2025, accedido el 17 mayo de 2025.
- [20] —, “Our Member States,” <https://home.cern/about/who-we-are/our-governance/member-states>, 2026, accedido el 12 febrero de 2026.
- [21] —, “CERN’s accelerator complex,” <https://home.cern/science/accelerators/accelerator-complex>, 2025, accedido el 17 mayo de 2025.
- [22] —, “Linear accelerator 1,” <https://home.cern./science/accelerators/linear-accelerator-1>, 2025, accedido el 17 mayo de 2025.
- [23] —, “Linear accelerator 2,” <https://home.cern./science/accelerators/linear-accelerator-2>, 2025, accedido el 17 mayo de 2025.
- [24] —, “Linear accelerator 3,” <https://home.cern./science/accelerators/linear-accelerator-3>, 2025, accedido el 17 mayo de 2025.

- [25] —, “Linear accelerator 4,” <https://home.cern./science/accelerators/linear-accelerator-4>, 2025, accedido el 17 mayo de 2025.
- [26] L. E. Cuevas-Picos, “DEVELOPMENT AND CALIBRATION OF THE LUMINOSITY MEASUREMENT SYSTEM CMS SILICON PIXEL DETECTOR,” Tesis de maestría, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas J, Calle Av. Rosales , Centro, 83000 Hermosillo, Son., 2023, accedido el 17 de mayo de 2025.
- [27] CMS Collaboration, “CMS Open Data Guide – luminosity measurement,” <https://cms-opendata-guide.web.cern.ch/analysis/lumi/>, 2023, accedido el 27 de mayo de 2025.
- [28] D. A. G. López, “ESTUDIO DEL MODELO DE RUIDO PARA LA MEDICIÓN DE LUMINOSIDAD CON PIXEL CLUSTER COUNTING EN CMS,” Tesis de licenciatura, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas J, Calle Av. Rosales , Centro, 83000 Hermosillo, Son., 2025, accedido el 17 de mayo de 2025.
- [29] W. C. Navidi, *Statistics for Engineers and Scientists*. New York: McGraw-Hill, 2003, international Edition.
- [30] CMS Open Data Workshop, “The CMS detector: Introduction,” <https://cms-opendata-workshop.github.io/workshop2024-lesson-cms-detector/instructor/01-introduction.html>, 2024, actualizado por última vez el 9 de julio de 2024 y accedido el 12 de febrero de 2026.
- [31] A. Sehwarat, “MEASUREMENT OF THE LUMINOSITY IN PROTON-PROTON COLLISIONS AT THE CMS EXPERIMENT OF THE LARGE HADRON COLLIDER,” Tesis de doctorado, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas J, Calle Av. Rosales , Centro, 83000 Hermosillo, Son., 2024, accedido el 17 de mayo de 2025.
- [32] CMS Open Data Workshop, “The CMS detector: Muon detectors,” <https://cms-opendata-workshop.github.io/workshop2024-lesson-cms-detector/instructor/06-muon.html>, 2024, actualizado por última vez: 2024-07-09 y accedido el 11 febrero de 2026.
- [33] —, “The CMS detector: Tracker detector,” <https://cms-opendata-workshop.github.io/workshop2024-lesson-cms-detector/instructor/02-tracker.html>, 2024, actualizado por última vez el 9 de julio de 2024 y accedido el 7 febrero de 2026.
- [34] N. Demaria, “The CMS silicon strip tracker: Status and performance,” *Proceedings of Science*, vol. Vertex2011, p. 010, 2011, poS(Vertex 2011)010, 20th Anniversary International Workshop on Vertex Detectors (VERTEX 2011), Rust, Austria, June 19–24, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://pos.sissa.it/137/010/pdf>

- [35] M. Axer, “Development of a test system for the quality assurance of silicon microstrip detectors for the inner tracking system of the CMS experiment,” Ph.D. dissertation, RWTH Aachen University (Aachen, Tech. Hochsch.), Aachen, Germany, May 2003, PhD thesis. CERN repository record; PDF listed as `Thesis-2003-Axer.pdf` (CDS: 1293523). [En línea]. Disponible en: <https://repository.cern/records/5z0ye-k4b26>
- [36] K. Klein and CMS Collaboration, “The phase-1 upgrade of the CMS pixel detector,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 845, pp. 101–105, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216305824>
- [37] “Luminosity determination using the pixel cluster counting method for the 2022–2023 LHC proton–proton run,” CERN, Geneva, Tech. Rep. CMS AN-2023/169, 2023, internal CMS Analysis Note.
- [38] P. R. Bevington and D. K. Robinson, *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*, 3rd ed. New York: McGraw–Hill, 2003.
- [39] P. D. Group, R. L. Workman *et al.*, “Review of particle physics,” *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, vol. 2022, no. 8, p. 083C01, 2022.
- [40] R. L. Thorndike, “Who belongs in the family?” *Psychometrika*, vol. 18, no. 4, pp. 267–276, Dec. 1953.