

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
PROGRAMA DE DOCTORADO
DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGIA Y MEDIO
AMBIENTE



TESIS

**ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DE LAS RADIACIONES ATMOSFÉRICAS
QUE AFECTAN A LOS CIRCUITOS INTEGRADOS EN LA CIUDAD DE
PUNO**

PRESENTADA POR:

EUDES RIGOBERTO APAZA ESTAÑO

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA, TECNOLOGIA Y MEDIO AMBIENTE

PUNO, PERÚ

2017

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

ESCUELA DE POSGRADO

PROGRAMA DE DOCTORADO

DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGIA Y MEDIO AMBIENTE

TESIS

**ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DE LAS RADIACIONES ATMOSFÉRICAS QUE
AFECTAN A LOS CIRCUITOS INTEGRADOS EN LA CIUDAD DE PUNO**

PRESENTADA POR:

EUDES RIGOBERTO APAZA ESTAÑO

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA, TECNOLOGIA Y MEDIO AMBIENTE

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:

PRESIDENTE


.....
Dr. EDGARDO PINEDA QUISPE

PRIMER MIEMBRO


.....
Ph.D. JUAN MARCOS ARO ARO

SEGUNDO MIEMBRO


.....
Dr. ANTONIO WALTER SARMIENTO SARMIENTO

ASESOR DE TESIS


.....
Dr. JOSE EMMANUEL CRUZ DE LA CRUZ

Puno, 03 de Febrero del 2017.

ÁREA: Ciencia, tecnología y medio ambiente

TEMA: Tecnología moderna y la tradicional en el mundo andino

LÍNEA: Tecnología moderna y la tradicional en el mundo andino

DEDICATORIA

Dedico los logros alcanzados en la realización de esta tesis a:

- A Dios por brindarme la luz necesaria para encaminarme con confianza, actitud y sobretodo con tolerancia y salud para llegar a las metas que me he propuesto.
- Mis Padres (+), Dionicio y Eulogia porque me brindaron el mejor ejemplo de perseverancia. A mi hija Fabiana por ser mi mayor inspiración. A mi esposa Gladis por su apoyo incondicional.

¡Gracias de todo corazón!

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional del Altiplano - Puno (UNAP), por las enseñanzas y la oportunidad de mejores logros profesionales.
- Al Ph.D. Juan Marcos Aro Aro, por su valiosa guía y asesoramiento en la presente tesis.
- Al Dr. José Emmanuel Cruz de la Cruz, por el apoyo como asesor de tesis.
- Al Dr. Carlos Silva Cárdenas, por el apoyo en la realización de la presente tesis.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
INDICE DE ANEXOS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I**PROBLEMÁTICA DE INVESTIGACION**

1.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2	ENUNCIADO DEL PROBLEMA	4
1.2.1	Problema general	4
1.2.2	Problemas específicos	4
1.3	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.3.1	Objetivo general	4
1.3.2	Objetivos específicos	4
1.4	HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN	5
1.4.1	Hipótesis general	5
1.4.2	Hipótesis específicas	5
1.5	SISTEMA DE VARIABLES	5
1.6	JUSTIFICACIÓN	7

CAPITULO II**MARCO TEÓRICO**

2.1	ANTECEDENTES	9
2.2	MARCO REFERENCIAL	14
2.2.1	Radiaciones Atmosféricas	14
2.2.2	Tormentas solares	24
2.2.3	Anomalía del Atlántico Sur	29
2.2.4	Neutrones y espectrometría de Neutrones	32
2.2.5	Método de Montecarlo	35
2.3	MARCO CONCEPTUAL	38

CAPÍTULO III**METODOLOGÍA**

3.1	ÁMBITO O LUGAR DE ESTUDIO	39
3.2	POBLACIÓN Y MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN	40
3.2.1	Población y muestra	40
3.3	TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	40
3.3.1	Método de investigación	40
3.3.2	Tipo de investigación	40
3.3.3	Diseño de investigación	41
3.4	TÉCNICAS, INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS Y DISEÑO ESTADÍSTICO	41
3.4.1	Técnicas	41
3.4.2	Instrumentos	41
3.4.3	Técnicas de procesamiento y análisis estadístico	42

3.5	RECURSOS COMPUTACIONALES Y DE HARDWARE	43
3.5.1	Para la medida de los neutrones	43
3.5.2	Para la elaboración del algoritmo de Montecarlo	45

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	46
4.1.1	Mediciones reales en la ciudad de Puno	46
4.1.2	Efectos de las tormentas solares	47
4.1.3	Efectos de la anomalía del Atlántico Sur	49
4.1.4	Radiaciones que afectan los Circuitos Integrados	50
4.1.5	Algoritmo de Montecarlo e implementación del programa en Matlab	54
4.1.6	Comparación de los valores obtenidos en la simulación con los valores reales obtenidos en la ciudad de Puno y los valores de la ciudades de Guadalajara España y Oulu Finlandia	56
4.1.7	Valores estadísticos obtenidos e interpretación de datos	58
4.1.8	Prueba de hipótesis	61
	CONCLUSIONES	63
	RECOMENDACIONES	64
	BIBLIOGRAFÍA	65
	ANEXOS	77

ÍNDICE DE TABLAS

1. Sistema de variables.	6
2. Componentes de los rayos cósmicos.	20
3. SEEs no destructivos.	23
4. SEEs destructivos.	23
5. Lugares medidos, con altitud, rigidez de corte y potencial de modulación solar.	32
6. Resumen de resultados medidos y calculados.	32
7. Características del medidor FHT 762 WENDI-2.	44
8. Valores promedios obtenidos por Montecarlo.	56
9. Estadísticos obtenidos.	60
10. Estadísticos de comparación obtenidos.	60
11. Análisis ANOVA.	62

ÍNDICE DE FIGURAS

1. Anillos de radiación.	14
2. Interacción del viento solar con la magnetosfera.	17
3. Esquema de la absorción de la radiación por parte de la atmósfera.	21
4. Principales modos de producción de partículas secundarias a través de la atmósfera. A la izquierda se encuentra la componente electromagnética, al centro muónica y a la derecha la nucleónica.	22
5. Ilustración de una tormenta solar dirigiéndose hacia la Tierra y luego impactando la magnetosfera, nuestro campo magnético defensor.	26
6. Mapa mundial del campo magnético a 2 km de altitud, obtenido del sistema SPENVIS.	31
7. Ubicación geográfica de la ciudad de Puno, provincia de Puno región de Puno.	39
8. Medidor de neutrones.	44
9. Valores medidos en la ciudad de Puno.	46
10. Evolución anual de las tormentas solares.	48
11. Modelo Gufm Anomalía del Atlántico Sur.	49
12. Diagrama de flujo del programa.	54
13. Algoritmo de Monte Carlo – C Test – PUNO – Code.	55
14. Resultados de la simulación de Montecarlo para la ciudad de Puno.	56
15. Aproximación por Montecarlo al valor promedio de Puno.	57

16. Mediciones realizadas y valores proporcionados por el modelo de Montecarlo en Puno del 2 de abril al 2 de agosto del 2016. 59

ÍNDICE DE ANEXOS

1. Exposición de resultados en ANDESCON 2016. 78
2. Valores medidos en la ciudad de Puno con el equipo FHT 79
762 WENDI – 2.
3. Resultados obtenidos para las ciudades de Guadalajara y 82
Oulo con el algoritmo de Montecarlo.
4. Resultados obtenidos para la ciudad de Puno con el 85
Algoritmo de Montecarlo.

RESUMEN

La radiación atmosférica natural está compuesta por rayos cósmicos secundarios producidos por la incidencia de rayos cósmicos primarios que golpean la atmósfera. Este trabajo de tesis, básicamente trató de la medición de radiaciones específicamente la de neutrones, y el posterior modelamiento de las mismas a partir del método de Montecarlo. Al medir y modelar la cantidad de rayos que inciden en la atmosfera en ciudades que se encuentran en altura, como la ciudad de Puno, permitirá determinar los efectos de tales rayos sobre los circuitos integrados que operan en casi todos los equipos utilizados en la actualidad. Para ello se analizó las distintas radiaciones atmosféricas, tomando sólo la más importante: los neutrones, aquí se consideró algunos parámetros externos como las tormentas solares y la anomalía del Atlántico Sur. La cantidad de neutrones se midió con ayuda del detector de neutrones FHT 762 WENDI-2. Se realizó el análisis estadístico entre los datos reales y los del modelo generado con el método de Montecarlo, estadístico muy utilizado en situaciones de incertidumbre, el cual se acomoda al tipo de datos a ser recolectados y modelados; las medidas realizadas se realizaron del 2 de abril al 2 de agosto del 2016. Como resultado se comprobó que el método de Montecarlo modeló de manera adecuada la incidencia de radiaciones atmosféricas: neutrones que afectan los circuitos integrados en la ciudad de Puno.

Palabras clave: Matlab, microelectrónica, Montecarlo, neutrones, radiaciones atmosféricas, SEE.

ABSTRACT

The natural atmospheric radiation is composed of secondary cosmic rays produced by the incidence of primary cosmic rays hitting the atmosphere. This thesis work, basically tried the radiation measuring specifically the neutrons, and subsequent modelling of them from the Monte Carlo method. By measuring and modeling the number of lightning strikes in cities in high altitude, such as the city of Puno, will determine the effects of such lightning on integrated circuits that operate in almost all equipment used today. For this, we analyzed the different atmospheric radiations, taking only the most important: neutrons, here we considered some external parameters such as solar storms and the South Atlantic anomaly. The amount of neutrons was measured using the FHT 762 WENDI-2 neutron detector. Statistical analysis was performed between the actual data and those of the model generated with the Montecarlo method, a statistic widely used in situations of uncertainty, which accommodates the type of data to be collected and modeled; the measurements were carried out from April 2 to August 2, 2016. As a result, it was verified that the Monte Carlo method adequately modeled the incidence of atmospheric radiation: neutrons that affect integrated circuits in the city of Puno.

Keywords: Matlab, microelectronics, Monte Carlo, atmospheric radiations, SEE, neutrons.

INTRODUCCIÓN

Las consecuencias de los SINGLE EVENT EFFECTS (SEE) producidos por iones pesados, sobre los dispositivos electrónicos han sido estudiados durante mucho tiempo, pero actualmente con la tecnología de fabricación que está debajo de los 100nm, las radiaciones débiles, son las que causan la mayor cantidad de daños. Para entender mejor estos efectos se han desarrollado modelos de algoritmos con herramientas de predicción tales como: The IBM soft-error Monte Carlo model, Radiation Effects Simulation Strategy (RADSAFE) y Multi-Scales Single Event Phenomena Predictive Platform (MUSCA SEP3). Todos estos modelos han sido probados en distintas condiciones: generalmente en ciudades de Europa, o en naves espaciales, pero ninguno modela los efectos para ciudades que se encuentran en altura superior a los 3000 msnm. Esto debido a que la casi totalidad de ciudades de Europa, América del Norte y Asia se encuentran a alturas por debajo de los 2000 msnm. Es necesario determinar la radiación que inciden en ciudades de altura, tal como la ciudad de Puno, establecer su modelamiento con ayuda del Algoritmo de Montecarlo y así iniciar un estudio del efecto de las radiaciones en los circuitos integrados que se encuentran en ciudad de altura.

El trabajo de investigación se estructura en cuatro capítulos:

En el capítulo I, se detalla el planteamiento y enunciado del problema. También la justificación, hipótesis y objetivos del presente trabajo de tesis.

En el capítulo II, se destaca los fundamentos teóricos de la investigación, pretendiendo asumir una posición de análisis de los antecedentes, bases

teóricas y conceptos básicos referentes al estudio, que permite la concepción de definiciones y terminología básica para su comprensión.

En el capítulo III, para concretizar el trabajo, se presenta el ámbito de estudio, el tipo de investigación y la población de estudio, asimismo la metodología empleada, técnicas e instrumentos de investigación teniendo en cuenta procedimientos pertinentes a un diseño estadístico apropiado, para cada objetivo presentado.

En el capítulo IV, se presenta los resultados de la investigación, los cuales están expresados en cuadros y gráficos especialmente estadísticos para su mejor comprensión, los que fueron importantes, ya que se probó las hipótesis planteadas, considerando los objetivos presentados.

CAPÍTULO I

PROBLEMÁTICA DE INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria de la microelectrónica de semiconductores cubre una gama muy amplia de aplicaciones y es muy dinámica en términos de investigación y desarrollo. Por lo tanto, la aparición de nuevos componentes en el mercado (así como la obsolescencia de los viejos) se lleva a cabo a un ritmo muy rápido, con la consiguiente llegada de nuevos efectos y dependencias con los parámetros y entornos operativos (García, 2014). Entre los principales podemos mencionar:

- Las tecnologías debajo de los 100nm. muestran una mayor sensibilidad a los efectos producidos por los protones de baja energía producidos en la atmósfera, debido a su mayor densidad de integración, su mayor rapidez y su menor consumo
- Estas aplicaciones incluyen el almacenamiento de programas para procesar, memorias intermedias de datos temporales, almacenamiento de datos masivos en memorias de estado sólido, y el almacenamiento de configuraciones para las memorias estáticas de acceso aleatorio (SRAM) (Ladbury et al. 2009) y (Oldham et al. 2009).

1.2 ENUNCIADO DEL PROBLEMA

1.2.1 Problema general

¿La cantidad de radiaciones en ciudades de altura difieren en cantidad de las radiaciones que afectan a los circuitos integrados en ciudades que se encuentran a nivel del mar?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Qué radiaciones afectan en mayor grado a los circuitos integrados en ciudades ubicadas en altura?
- ¿Se puede modelar un algoritmo que prediga el número de radiaciones que afecten a los circuitos integrados en ciudades de altura?

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Objetivo general:

Analizar y modelar las radiaciones atmosféricas que afectan a los circuitos integrados en la ciudad de Puno.

1.3.2 Objetivos específicos:

- Analizar las distintas radiaciones atmosféricas que afectan a los circuitos integrados.
- Elaborar el algoritmo de Montecarlo que prediga la cantidad de radiaciones en una ciudad de Puno.

1.4 HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

1.4.1 Hipótesis general

Los niveles de radiación que afectan a los circuitos integrados difieren en ciudades de altura con respecto a las ciudades al nivel del mar.

1.4.2 Hipótesis específicas

- Las radiaciones que afectan en mayor grado a los circuitos integrados son neutrones y protones.
- El algoritmo de Montecarlo modela la radiación que afecta a los circuitos integrados.

1.5 SISTEMA DE VARIABLES

Tabla 1. Sistema de variables.

Variables(s)	Dimensión(es)	Indicador(es)	Categoría(s)	Índice(s)	Instrumento(s)
Variable					
independiente:					
Método de Montecarlo					
Variable					
dependiente:					
Modelamiento de radiaciones recibidas en la ciudad de Puno					
Variable					
independiente:					
Radiaciones		Radiaciones		Porcentaje	Guía de observación de campo
Variable					
dependiente:					
Cantidad de radiaciones	Tipos de radiaciones	Cantidad de tipo de radiaciones			
Variable					
independiente:					
Método de Montecarlo		Medidas tomadas		Porcentaje	
Variable					
dependiente:					
Radiaciones		Eficiencia de predicción			Guía de observación de campo
Números aleatorios		- Muy bueno		- 80 a 100%	
		- Bueno		- 60 a 80%	
		- Regular		- 20 a 60%	
		- Bajo		- 10 a 20%	

1.6 JUSTIFICACIÓN

Los efectos de SINGLE EVENT EFFECTS (SEE) producidos por iones pesados, sobre los dispositivos electrónicos han sido estudiados durante mucho tiempo. Como consecuencia de estos estudios se han tomado medidas para proteger los circuitos integrados de las radiaciones duras, tales como material aislante, grosor de la capa de óxido, entre otros. Pero actualmente con la tecnología de fabricación que está debajo de los 100nm, las radiaciones débiles, son las que causan la mayor cantidad de daños. Por ejemplo, en memorias SRAM se utilizan códigos de detección de errores, que corrigen los efectos inducidos por este tipo de partículas. Para entender mejor estos efectos se han desarrollado modelos de algoritmos con herramientas de predicción como: The IBM soft-error Monte Carlo model (SEMM-2), Radiation Effects Simulation Strategy (RADSAFE) por ISDE en la Universidad de Vanderbilt y Multi-Scales Single Event Phenomena Predictive Platform (MUSCA SEP3) por ONERA. Todos estos modelos han sido probados en distintas condiciones: generalmente en ciudades de Europa, o en naves espaciales, pero ninguno modela los efectos para ciudades que se encuentran en altura superior a los 3000 msnm. Esto debido a que la casi totalidad de ciudades de Europa, América del Norte y Asia se encuentran a alturas por debajo de los 2000 msnm.

En este trabajo de investigación se determinó la radiación que inciden en ciudades de altura, los neutrones, en la ciudad de Puno; se realizó su modelamiento con ayuda del Algoritmo de Montecarlo y se corroboró los resultados con trabajos similares y datos proporcionados por la Real-time Neutron Monitor Database (MNDB) específicamente se comparó con valores tomados en la ciudad de Guadalajara España ubicada a 708 msnm.

Finalmente, los resultados de este modelamiento ayudarán a determinar la incidencia de rayos cósmicos: neutrones, que influirán en la capacidad de trabajo de ciertos circuitos integrados en ciudades que se encuentran sobre los 3000 msnm.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

Antecedentes a nivel local y nacional, no se encuentran. Entre los antecedentes a nivel internacional mencionaremos:

En la parte de conclusiones indica: Se comparó de manera detallada la sensibilidad SER neutrones de las celdas SRAM implementadas con MOSFETs planas y FinFETs. Sobre la base de estudios teóricos, factores tales como los materiales en BEOL, perfil de dopaje en el sustrato, elementos eléctricos, y la geometría de transistor, que pueden influir en la sensibilidad SEU en los dispositivos. Con el fin de validar el análisis teórico, ambos tipos de SRAM fueron probados experimentalmente. Se analizaron los resultados teniendo en cuenta las diferencias en los espectros de las instalaciones. Los datos experimentales se compararon con los resultados de simulación obtenidos utilizando herramientas TCAD y simulación TFIT utilizando un modelo de respuesta calibrada. A pesar de que la tensión de alimentación y la carga de capacitancia disminuye, utilizando la simulación TFIT, se observó una ligera disminución de

la carga crítica en el FinFET en comparación con el MOSFET planar. Esto es debido a la vecindad de elementos eléctricos. La gran disminución de SER para el FinFET no puede explicarse solamente en base a la carga crítica. Mediante la simulación de umbral de LET, la tendencia muestra la carga recogida respecto a la carga depositada juega un papel menor en la determinación de la transferencia de energía lineal. La reducción de las cargas colectadas por el drenador está directamente relacionada a la geometría de los transistores FinFET (Noh, 2011). Esto impacta de manera drástica en los niveles de errores de software y en el umbral LET. Así mismo en otra investigación expresa: La expectativa de que la microelectrónica operará de manera confiable requiere la previsión y mitigación de los efectos de las radiaciones. Se propuso en esta investigación que los trastornos de eventos individuales (SEUs) en memorias submicrónicas serán causados por la ionización directa de partículas de una sola carga. Se ha especulado desde los inicios de la industria que estas partículas podrían exhibir un efecto en dispositivos suficientemente sensibles. Sin embargo, los dispositivos que se han fabricado hasta la actualidad no han sufrido estos efectos. En este trabajo se ha demostrado experimentalmente que los trastornos de eventos individuales que atraviesan la sección cruzada con protones de baja energía en 65nm y de más pequeña masa, en tecnologías CMOS son suficientemente grandes para causar ionización en la masa del dispositivo en espacios enriquecidos de protones. El método y las instalaciones utilizadas para recopilar los datos no sólo muestran que existe una sensibilidad a los protones en las tecnologías probadas, sino también causan trastornos de efectos individuales que pueden ser utilizados en el modelamiento y predicción de tasas

de error. Se necesitan desarrollar técnicas experimentales para obtener datos similares para los muones (Noh, 2015) y (Sierawski, 2011).

En otro informe se resumieron las radiaciones ambientales y los niveles encontrados durante los primeros años de funcionamiento del LHC aceleradores de alta energía y sus particularidades en áreas LHC críticas. La distribución de energía, así como la proporción de los diferentes tipos de partículas depende de la distancia y del ángulo con respecto al punto de interacción, así como la cantidad de material de blindaje instalado. Los componentes electrónicos y sistemas expuestos a tal mezcla de radiaciones puede ser catalogado en alguno de los siguientes tipos de daños por radiación: Efectos de evento simple (SEE), daño de dosis total de ionización (TID) y daño por desplazamiento (DD), donde en todos los casos, no sólo el tipo de partículas, sino también la distribución de energía respectiva deben ser consideradas, especialmente si los materiales de alto Z están presentes cerca de la región sensible del dispositivo, así también como que el impacto de neutrones térmicos no pueden ser despreciados para varios casos (Brugger, 2014) y (Sierawski, 2010). También se reporta las medidas de single events upset (SEU) inducidas por la colisión de muones. Pruebas realizadas demuestran que la cuenta de errores producidos por SEU, aceleradas por un haz de energía es consistente con la curva de pérdida de energía. Pruebas de aceleración de neutrones y predicciones en la tasa de error de software son prácticas estándar para aplicaciones microelectrónicas a nivel de la superficie terrestre con alta tasa de fiabilidad. Los datos presentados aquí, sin embargo, sugieren que el SER en tecnologías futuras también puede verse afectada por muones. Considerando que los neutrones raramente interactúan con los núcleos, ambos protones y muones son capaces de generar cargas a

través de la fuerza electromagnética. Por lo tanto, los flujos de muones y protones de baja energía tienen el potencial para ser un componente importante de la SER para los dispositivos sensibles. Nuestros resultados sugieren que los trastornos inducidos por muones no afectan la tasa de error para SRAM de 65nm y 45nm SRAM que operan a un voltaje de alimentación nominal, pero parecería que tendrán un mayor impacto para circuitos fabricados en tecnologías de proceso más pequeños con valores de carga inferior críticos. En última instancia, SRAM, Flip-flops, y circuitos de lógica combinacional pueden ser sensibles al espectro de baja energía de los muones. Las futuras predicciones de tasa de error terrestres requerirán caracterización de los niveles de umbral LET, la consideración de la presencia de muones en el medio ambiente y cálculos avanzados en el transporte de radiaciones (Brugger, 2014) y (Sierawski, 2010).

Otros antecedentes indican: Los experimentos han demostrado que los SEUs producidos por muones en su sección transversal se incrementan debido a la reducción del voltaje de operación sobre el rango de los muones probados. Esta tendencia ayuda a comprender los efectos desconocidos relativos de ionización de muones. Además, se demostró que los trastornos se pueden observar en componentes empacados que están al alcance de los muones. Pruebas reducidas de polarización aceleradas han sido propuestas como una indicación clave del aumento de la tasa de fallos en el medio ambiente terrestre. Para los dispositivos de 28nm ensayados en este trabajo, la sensibilidad a una gama más amplia de las energías de muones no ha aumentado significativamente (Sierawski, 2014) y (Hongyu, 2013). La continua investigación en los métodos y mecanismo de prueba asociados con los fallos producidos por muones y protones ayudará a mejorar el análisis de los datos producidos por los

muones acelerados y las predicciones tasas de errores” Así también: “Haces de partículas de alta energía son utilizadas ampliamente para permitir pruebas aceleradas de dispositivos y sistemas electrónicos contra los Single Event Effects (SEE) inducidos por los neutrones. En algunas instalaciones de neutrones, tales como TSL, LANSCE e ISIS, los experimentos pueden llevarse a cabo con varios conjuntos de prueba dispuestas a lo largo de una línea de haz. En tales casos, sin embargo, los dispositivos que se colocan más lejos de la fuente de haz reciben un haz degradado debido a la absorción y la dispersión. La consiguiente pérdida de fluencia de neutrones no se puede explicar por el monitoreo del haz en sus inicios. Con el fin de hacer estimaciones fiables de los SEE en secciones transversales, se requiere el monitoreo de los haces de neutrones locales. Como tal, el presente estudio ha tratado de desarrollar un sistema de seguimiento de haz basado en sensores de fotodiodo de modo que las pruebas pueden ser efectuadas, en varios dispositivos simultáneamente en el camino del haz de neutrones, tales como LANSCE, TSL e ISIS, lo que demuestra la utilidad de la corrección de la degradación del haz por experimentos en el origen de los haz. En este proyecto, doce sensores con ligeramente diferentes circuitos y dos tipos de anchos de pulso (20 microsiemens y 40 microsiemens) se han desarrollado y se irradia a TSL, TRIUMF, ASP y LANSCE. Esta tesis presenta el diseño del sistema, procesamiento de señales en el sistema, y los resultados experimentales. También se evalúa el rendimiento del sistema y protocolos de ensayo recomendados (Sierawski, 2014) y (Hongyu, 2013).

2.2 MARCO REFERENCIAL

2.2.1 Radiaciones atmosféricas

El planeta Tierra está siendo bombardeado por diversas partículas, las que son afectadas por la atmósfera terrestre en diversos grados. Las partículas tienen diversos orígenes, pero se pueden destacar cuatro, que son: los cinturones de Van Allen, las erupciones solares, los vientos solares y los rayos cósmicos. Los cinturones de Van Allen producen electrones cuya energía varían de 5 a 7MeV, en función a la capa del cinturón a la que pertenecen. Los vientos y erupciones que emiten radiaciones que van de keV a algunas centenas de MeV (Salazar, 2013) y (Aoki et al.,1982).

A. Cinturones de Van Hallen

Denominados también como anillos de radiación a dos enormes zonas de electrones y protones que se encuentran circundando la Tierra con forma toroidal, como observamos en la figura 1.

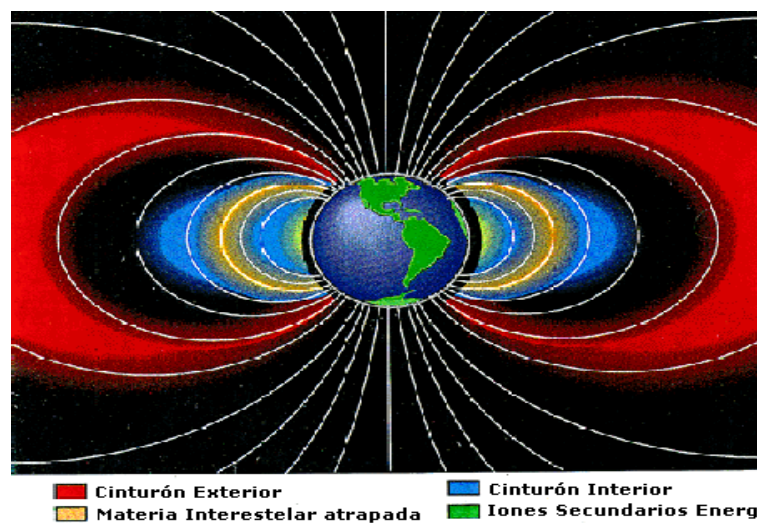


Figura 1.Anillos de radiación.

Fuente: (Heynderickx, 2002)

Los anillos contienen electrones y protones atrapados. Esta radiación atrapada incluye dos anillos de electrones. El anillo interior contiene electrones cuya energía es de menos de 5MeV, mientras que el anillo exterior contiene electrones cuya energía puede alcanzar hasta los 7MeV. Además, en el caso del anillo exterior, el flujo de electrones es más variable y más intenso que en el caso del anillo interior. Un tercer cinturón de electrones fue observado después de una tormenta magnética el 24 de marzo de 1991. Este cinturón está localizado entre el primer y segundo anillo y la energía atrapada en él es significativa, alcanzando hasta 30MeV.

La radiación atrapada incluye también un cinturón interno de protones. Un cinturón secundario, que contiene protones de alta energía ($>100\text{MeV}$), apareció después de la misma tormenta magnética comentada anteriormente. Por tanto, una violenta tormenta magnética puede generar nuevos anillos de radiación cuya esperanza de vida, que se estima en más de dos años, no es conocida con precisión (Sanchez y Tartagliones, 2010) y (Ditcher et al., 1998).

B. Erupciones solares

Denominados por algunos autores llamas solares (solar flares) son explosiones violentas que se producen en la atmósfera solar, y que pueden liberar una energía de hasta $6 \times 10^{25}\text{J}$. Tienen lugar en la corona solar, y tienen como consecuencia el calentamiento del plasma hasta 10 millones de grados Kelvin y la aceleración de

electrones, protones e iones pesados hasta velocidades cercanas a la de la luz. El ciclo solar consta de 11 años, coincidiendo el final del mismo con la aparición de numerosas manchas solares. Este ciclo puede a su vez subdividirse en cuatro años de baja actividad y siete de alta. Hay dos tipos de eventos que deben ser considerados en relación con los entornos radiantes que estamos estudiando. El primero se conoce como coronal mass ejection's, y dura varios días, en los que emite principalmente protones con alta energía (por encima de las centenas de MeV). El segundo tipo de evento se enmarca en la categoría de eventos impulsivos o transitorios, y consiste en la emisión masiva de iones pesados. Éstos incluyen las llamaradas solares con emisiones de iones de gran energía (de varias decenas de MeV a varias centenas de GeV por nucleón) (IEEE, 1991), (Bühler et al., 1999) y (Chen y Garren, 1993).

C. Viento solar

Las altas temperaturas de la corona solar ceden suficiente energía a los electrones como para permitirles escapar de la fuerza gravitacional del Sol. El efecto de la expulsión del electrón es una carga sin balancear que provoca la expulsión de protones e iones pesados de la corona. El gas expulsado es tan caliente que las partículas están distribuidas homogéneamente en un plasma. La alta densidad de energía del mismo hace que el campo magnético solar esté "congelado" dentro del plasma. Este plasma eléctricamente neutro avanza alejándose del Sol a una velocidad de aproximadamente 300 a 900 km/s, con una temperatura de 10^4 a

10^6 K. La energía de las partículas va de 0.5 a 2 keV por nucleón, aproximadamente. La densidad media del viento solar es de 1 a 30 partículas/cm³. La composición del viento solar es aproximadamente: 95 % p⁺; 4 % He⁺⁺; < 1 % otros iones pesados y el número de electrones necesarios para hacerlo neutro.

(<http://www.conae.gov.ar/satelites/sac-c.html>).

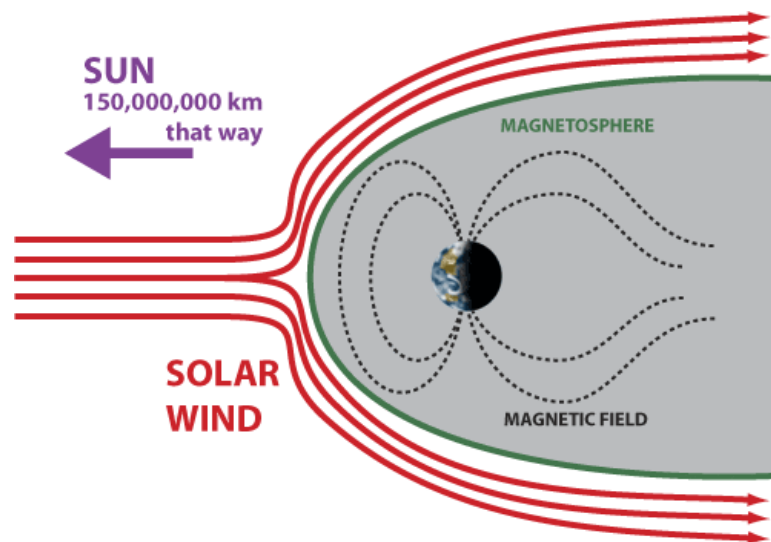


Figura 2. Interacción del viento solar con la magnetosfera.

Fuente: (Russell, 2000)

Las mayores perturbaciones en el campo geomagnético pueden ocurrir como consecuencia de cambios en la densidad del viento solar (por ejemplo: llamaradas solares), la velocidad del viento solar o la orientación del campo magnético solar. Los eventos comentados en el anterior apartado pueden provocar distorsiones en el viento solar, y son estas distorsiones las que al interactuar con la magnetosfera terrestre causan las llamadas tormentas magnéticas. La correlación existente entre el número de tormentas con el nivel

de actividad solar es muy fuerte. Durante el período de alta actividad solar, se observan numerosas fluctuaciones en el campo magnético solar, y esto conlleva una compresión de las líneas de campo magnéticas. Cuando esta compresión ocurre, el plasma situado en el lado nocturno es empujado hacia la superficie terrestre. Los iones y electrones son desviados por el campo magnético terrestre y como resultado, una astronave o satélite que esté orbitando los podría recibir. Así pues, las tormentas geomagnéticas tienen una gran relevancia debido a la radiación que producen. Mientras que el plasma a la altura de una órbita geoestacionaria está bastante caliente (unos 2keV por electrón y 10keV por ión), y presenta baja densidad (de 10 a 100 cm⁻³), en condiciones normales el plasma localizado en órbitas bajas está más frío y es incapaz de inducir cargas significativas. Sin embargo, debido a que las partículas energéticas pueden moverse a lo largo de las líneas de campo magnético, los satélites que estén en órbitas bajas pueden encontrar un plasma con más energía que el que localizaban en altitudes superiores. Tras numerosas observaciones, se ha observado que los electrones pueden verse cargados a varios kilovoltios, produciendo un plasma muy cargado. Este plasma energético se confina en regiones cercanas a los polos. Debido a que los satélites pasan periódicamente por esas zonas, el efecto no es muy acusado. Las diferencias entre las características de absorción de los materiales, la distinta exposición a la luz de sol, y los efectos puntuales hacen que distintas cantidades de electrones puedan producir diferencias

de tensión entre las superficies del satélite aisladas (este fenómeno se conoce como carga superficial). Además, los electrones que tengan suficiente energía como para traspasar la capa térmica inducen una carga interna en las superficies o ensamblajes. Los electrones altamente energéticos que penetran dentro pueden depositar carga en los circuitos y cables. Para mitigar estos efectos es conveniente el uso de filtros para prevenir la propagación de las señales transitorias y el uso de aisladores superficiales que sean capaces de disipar la carga depositada. También es recomendable proteger los circuitos electrónicos para reducir el flujo de electrones que puedan llegar hasta ellos (Benestad, 2006) y (Bertotti, Farinella y Vokrouhlický, 2003).

D. Rayos cósmicos

Los rayos cósmicos son núcleos de iones pesados altamente energéticos (sin la nube de neutrones rodeándolo). Estos iones pesados solo representan el 1% de los componentes nucleares de una radiación cósmica, que contienen un 83% de protones, un 13% de núcleo de helio y un 3% de electrones. El origen de esta radiación no ha sido identificado con certeza. Sin embargo, se sabe que parte de ella proviene de las cercanías de la galaxia Milky Way, y el resto del interior de la misma. La energía de los iones es muy alta (el ión más energético detectado tenía una energía de 3×10^{20} eV, esto es, casi 50 J) y los mecanismos de aceleración no siguen un modelo definido. La radiación cósmica es casi isotrópica cuando llega a las cercanías de la magnetosfera. Sin embargo, debido a

que la radiación se asocia con el campo magnético terrestre, la isotropía no se mantiene (Binder, Smith y Colman, 1975) y (Faure y Mensing, 2007).

E. Interacción con la atmósfera

Los rayos cósmicos que al actuar sobre las capas altas de la atmósfera inciden como una lluvia fina de partículas cargadas. No son rayos propiamente dichos, si no partículas subatómicas cargadas eléctricamente, fotones y neutrinos, cuya energía que entregan estos rayos cósmicos varían desde 108 eV hasta a1020 eV (Sierawski, 2011). La composición se describe en la siguiente tabla:

Tabla 2. Componentes de los rayos cósmicos.

COMPONENTE	PORCENTAJE
Protones	~ 83%
Núcleos de Helio	~ 13%
Electrones	~ 3%
Iones pesados	~ 1%

Fuente: (Velazco, Fouillat y Reis, 2007)

El esquema de la absorción de radiación por parte de la atmósfera es mostrado a continuación:

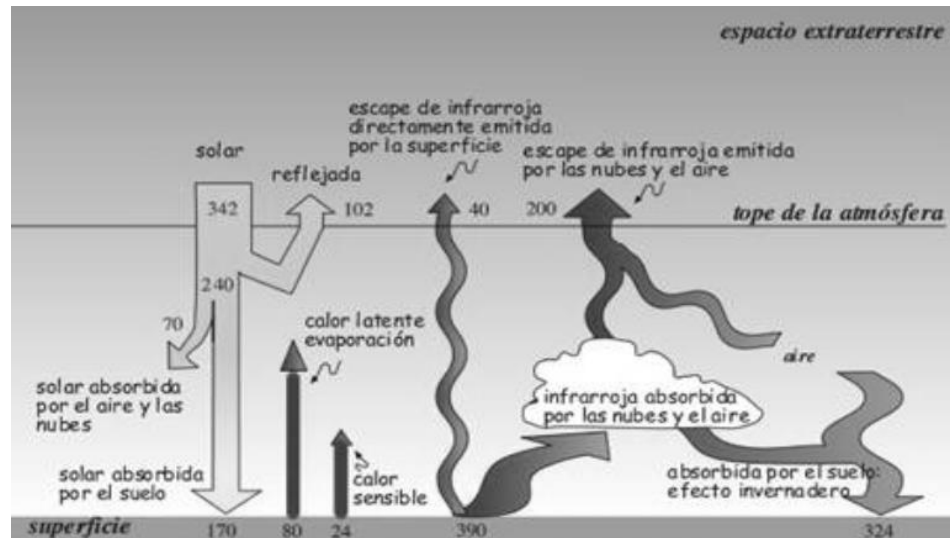


Figura 3. Esquema de la absorción de la radiación por parte de la atmósfera.

Fuente: (Rodriguez, 2007)

En el siguiente gráfico se muestra como se producen las partículas primarias y secundarias, las que finalmente interactúan con los seres humanos y sus dispositivos electrónicos.

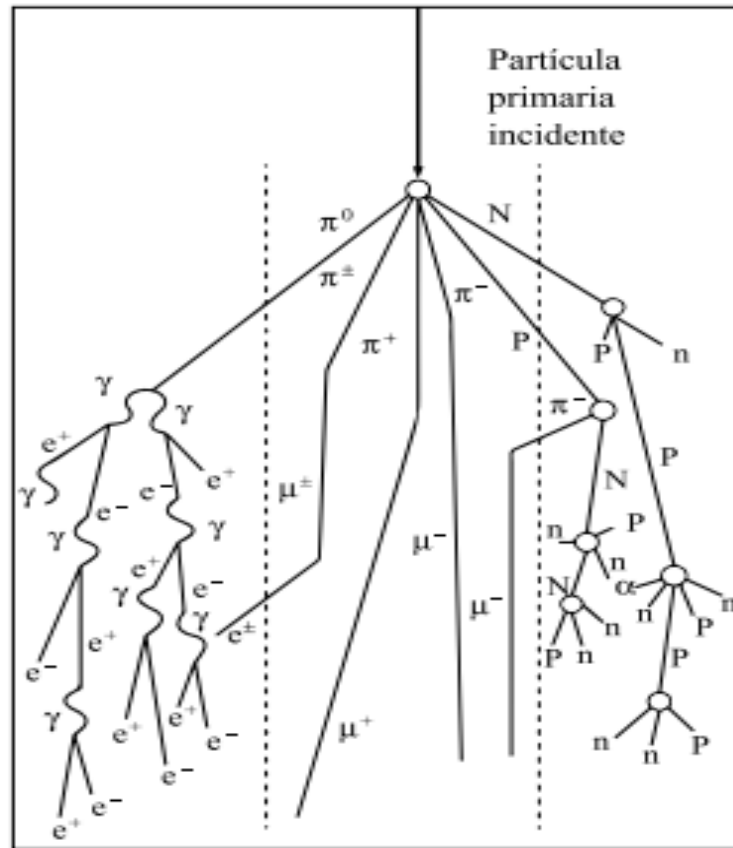


Figura 4. Principales modos de producción de partículas secundarias a través de la atmósfera. A la izquierda se encuentra la componente electromagnética, al centro muónica y a la derecha la nucleónica.

Fuente: (Mendoza, 2013)

F. Efectos sobre los Circuitos Integrados

Los efectos de todas estas radiaciones pueden causar efectos permanentes o transitorios en los circuitos integrados. Los fabricantes utilizan técnicas para proteger estos circuitos contra los efectos permanentes, pero los efectos temporales, no pueden ser detenidos por técnicas tradicionales de fabricación. Estos efectos

transitorios pueden ser descritos de manera sucinta con ayuda de las siguientes tablas:

Tabla 3. SEEs no destructivos.

Tipo SEE	Efecto	Módulos afectados
SEU	Corrupción de la información almacenada en un elemento de memoria	Memorias, latches en dispositivos lógicos
MBU	Varios elementos de memoria corrompidos por una sola partícula	Memorias, latches en dispositivos lógicos
SEFI	Funcionamiento anormal	Dispositivos complejos con secciones de control de estado
SED	Corrupción momentánea de la información almacenada en un bit	Lógica combinacional, latches en dispositivos lógicos
SHE	Elemento de memoria que permanece inalterado	Lógica combinacional, latches en dispositivos lógicos
SET	Respuesta impulsiva de cierta amplitud y duración	Circuitos analógicos y de señal mixta, dispositivos fotónicos

Fuente: (Rodríguez, 2007)

Tabla 4. SEEs destructivos.

Tipo SEE	Efecto	Dispositivos afectados
SEL	Conduce mucha corriente	CMOS. BiCMOS
SESB	Conduce mucha corriente	N-MOSFET, SOI
SEB	Destrucción del dispositivo	BJT, MOSFET de potencia
SEGR	Ruptura del dieléctrico de la puerta	MOSFET de potencia
SEDR	Ruptura del dieléctrico	Estructura nMOS, FPGAs

Fuente: (Rodríguez 2007)

2.2.2 Tormentas solares

A. Sol y las tormentas solares

El Sol entrega a la Tierra energía en forma de luz, partículas cargadas eléctricamente y campos magnéticos. Mientras la luz visible del Sol es casi constante, otras producciones solares son turbulentas y muy dinámicas. El Sol es un gran reactor termonuclear, fusionando átomos de hidrógeno y convirtiéndolos en helio; produciendo temperaturas de millones de grados e intensos campos magnéticos. La capa externa del Sol es semejante a una olla con agua hirviendo, con burbujas de gas caliente y electrizante, protones y electrones en un cuarto estado de la materia conocido como plasma circulan desde el interior subiendo hacia la superficie. Aunque el proceso no es del todo comprendido, esto resulta en campos magnéticos solares y en una corriente constante de partículas que emergen del Sol (Freeman, 2002), (Friis-Chistensen, 2008) y (Klahr y Brandner, 2006).

B. Tormentas solares

Hay dos clases de tormentas solares:

Destellos solares (solar flares) aparecen como áreas explosivas y brillantes en la superficie del Sol. Los destellos solares ocurren cuando la energía magnética se acumula en la atmósfera solar cerca de las manchas solares y repentinamente es liberada en un estallido equivalente a diez millones de erupciones volcánicas. Radiación, incluyendo ondas radiales, rayos-x y rayos gamma y partículas

eléctricamente cargadas, explotan desde el Sol después de un destello solar. Los destellos solares más fuertes ocurren sólo algunas veces al año, mientras que destellos solares más leves son relativamente comunes; tanto que pueden ocurrir hasta una docena de veces al día durante los periodos más activos del Sol (McCracken, Beer y McDonald, 2002) y (McFadden, Weissman y Johnson, 2007).

Expulsión de masa coronal (Coronal Mass Ejection- CME) Un CME es la erupción de una gran burbuja de plasma proveniente de la atmósfera externa del Sol o corona. La corona es la región gaseosa sobre la superficie solar que se extiende millones de millas hacia el espacio. La temperatura en esta región excede un millón de grados Celsius; 200 veces más caliente que la superficie del Sol. Un CME, en el transcurso de su viaje hacia el sistema solar, crea una onda de choque que acelera algunas de las partículas del viento solar a velocidades y niveles de energía extremadamente peligrosos creando radiación. Detrás de la onda de choque, la turbulencia del CME, viaja por el sistema solar impactando planetas, asteroides y otros objetos que contienen plasmas y campos magnéticos. Si un CME erupciona hacia el lado que da a la Tierra, y si su camino incluye la orientación de la Tierra en su órbita, los resultados pueden llegar a ser espectaculares y a la misma vez peligrosos (Mendoza, 2006) y (Weissman, McFadden y Johnson, 2007).

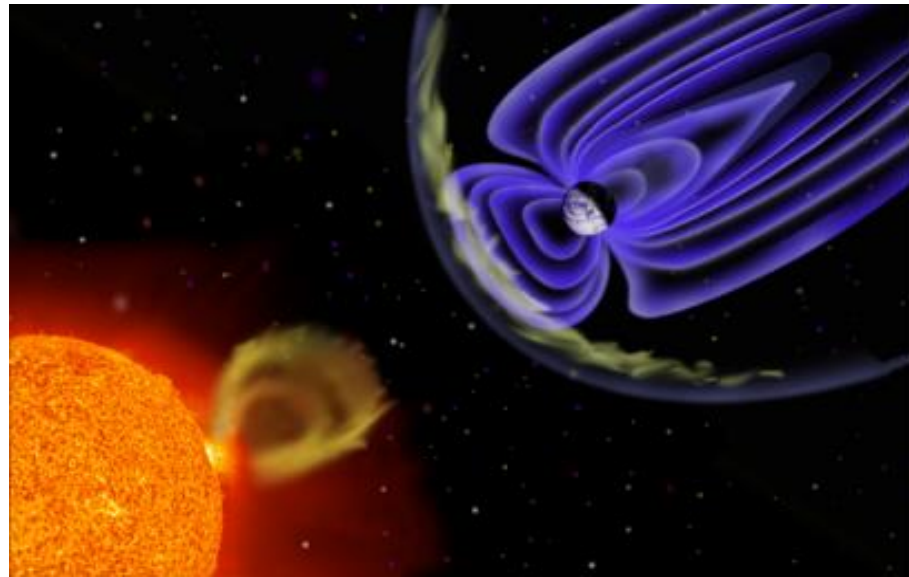


Figura 5. Ilustración de una tormenta solar dirigiéndose hacia la Tierra y luego impactando la magnetosfera, nuestro campo magnético defensor.

Fuente: https://Stereo.Gsfc.Nasa.Gov/Spaceweather/Swpost_Sp.Pdf

C. Realizando conexiones eléctricas

Las Expulsiones de Masa Coronal ocurren a una proporción de algunas veces a la semana hasta varias veces al día, dependiendo de cuán activo el Sol esté en ese momento. Las probabilidades dicen que la Tierra será impactada por un CME y efectivamente así ocurre. Afortunadamente, nuestro planeta está protegido de los efectos más dañinos de radiación y plasma caliente gracias a nuestra atmósfera y a una capa magnética invisible conocida como magnetosfera. La magnetosfera, producida por el campo magnético interno de la Tierra, nos protege de 99% del plasma solar, desviando el mismo al espacio. Sin embargo, de vez en cuando, parte de la energía del CME es transferida a nuestra magnetosfera canalizándose cerca de

los Polos Norte y Sur. Es allí donde el campo magnético es más débil y la magnetosfera se encuentra parcialmente abierta al espacio. El flujo de energía hacia nuestra magnetosfera puede inducir tormentas magnéticas, alterar el campo magnético de la Tierra y producir el fenómeno conocido como las auroras. Una gran cantidad de energía es descargada en el sistema magnético de la Tierra. Cuando el sistema magnético de la Tierra es estimulado por el plasma solar o por el plasma proveniente de partes distantes en la magnetosfera, los electrones, protones e iones de oxígeno localizados alrededor de la Tierra, se tornan más densos, calientes y con mayor velocidad. Estas partículas producen tanto como un millón de amperes de corriente eléctrica. Parte de esta corriente fluye por los campos magnéticos de la Tierra hacia las altas capas de la atmósfera. De igual manera, cuando las partículas excitadas dentro de la magnetosfera colisionan con oxígeno y nitrógeno, estas también pueden sumergirse en la alta atmósfera terrestre. Estas colisiones las cuales usualmente ocurren entre 40 y 200 millas sobre la tierra causan que el hidrógeno y el oxígeno se exciten eléctricamente y emitan luz. El resultado es una deslumbrante danza de luces verdes, azules, blancas y rojas conocidas como las auroras boreales y las auroras australes (luces del norte y del sur) (Florek et al., 1996) y (Goldhagen et al., 2002).

D. Cuando la Tierra es golpeada

Con una CME promedio descargando alrededor de 1500 Gigawatts de electricidad a la atmósfera grandes cambios pueden ocurrir en el espacio. Esos cambios pueden perturbar un mundo que depende de satélites, energía eléctrica, y radio comunicaciones, las cuales se ven afectadas por tormentas magnéticas. Por ejemplo, una serie de destellos solares y un CME en marzo del 1989, produjeron intensas tormentas magnéticas que dejaron a millones de personas en Québec, Canadá sin energía eléctrica por días, en algunos casos. Los CMEs y las tormentas magnéticas pueden ser especialmente peligrosas para el viento solar y para los satélites orbitando en las correas de radiación alrededor de la Tierra. Los iones energéticos acelerados por una tormenta pueden perturbar computadoras en naves espaciales y degradar los paneles solares utilizados para generar energía eléctrica a satélites. Plasmas energizados en el espacio terrestre pueden causar una acumulación de cargas eléctricas en la superficie de naves espaciales que producen chispas eléctricas dañinas. En 1994, dos satélites se apagaron involuntariamente durante tormentas magnéticas debido a esto, el servicio telefónico en todo Canadá fue interrumpido por meses. Durante el periodo de marzo del 1989, mencionado anteriormente, más de 1500 satélites bajaron su velocidad o se salieron de sus órbitas por varias millas debido al aumento en el arrastre atmosférico. Las tormentas magnéticas pueden borrar completamente comunicaciones radiales alrededor de los polos de

la Tierra por días. Las comunicaciones desde los satélites en tierra también son alteradas debido al efecto que el estado de perturbación de la ionosfera tiene en esas señales. Una gran cantidad de la información moderna es retransmitida por satélites; desde GPS hasta máquinas de cajeros automáticos. Las mismas están propensas a interrupciones diarias. Las tormentas magnéticas también pueden afectar la fuerza de los campos magnéticos de la Tierra. Estos cambios pueden producir oscilaciones de líneas de energía eléctrica y transformadores, al igual que corrientes eléctricas corrosivas en tuberías de gas y de aceite (Heinrich et al., 1999), (https://Stereo.Gsfc.Nasa.Gov/Spaceweather/Swpost_Sp.Pdf) y (Lemos, 2004),

2.2.3 Anomalía del Atlántico Sur.

Con este término se denomina a la región en el sur del océano Atlántico donde los cinturones de radiación Van Allen se encuentran a sólo 500 km de altura, mientras que estos cinturones normalmente se encuentran ubicados entre los 1.000 y los 5.000 kilómetros. Esto debido a una depresión en la intensidad del campo magnético de la Tierra, provocada porque el centro del campo magnético de la Tierra está desviado de su centro geográfico. Esta anomalía es gran importancia no sólo para los satélites y otras naves espaciales que orbitan a cientos de kilómetros de altitud con inclinaciones orbitales de 35° y 60°, ya que estas órbitas llevan a estos satélites a través de la anomalía de manera periódica, exponiéndolos durante varios minutos a una fuerte radiación afectando el funcionamiento de los instrumentos en órbita y potencial

mente peligrosa para la salud de los astronautas, también es de importancia para la navegación aérea. Así también la Tierra está continuamente expuesta a radiaciones solares y cósmicas, consistentes principalmente de protones, iones de helio y núcleos pesados. Estas radiaciones primarias interactúan con los constituyentes atmosféricos que producen radiaciones secundarias que consisten en partículas cargadas, neutrones, gammas, rayos X, adrones y muones, con un amplio rango de energía (Heinrich, Roesler y Schraube, 1999). Según (Kowatari et al., 2005) y (Sato et al., 2008) una de las barreras más importantes contra este tipo de radiación es el campo geomagnético, que desvía las radiaciones incidentes que tienen rigidez magnética menor que la rigidez de corte del campo en el punto de incidencia.

Se han realizado muchos estudios sobre estos fenómenos y los investigadores realizaron mediciones del flujo y dosis de estas radiaciones en el ambiente terrestre. Parte de estos estudios se realizan para los flujos de neutrones a nivel del suelo, donde la principal motivación es la exposición pública (Kowatari et al., 2005) y (Florek et al., 1996); la mayoría de estos estudios se realizaron en el hemisferio norte.

Gran parte de Brasil y América del Sur están bajo la influencia de una anomalía magnética denominada Anomalía del Atlántico Sur (SAA), como se muestra en la figura 6, que modifica la altitud de las radiaciones cósmicas y la forma de penetración. En esta área el campo geomagnético es aproximadamente 30% menos de lo que cabría esperar en latitudes y altitudes similares alrededor del globo. Muy pocas mediciones se han hecho en esta región, en comparación con las otras regiones del mundo.

La presencia del SAA justifica un esfuerzo por detallar experimentalmente los espectros de radiación cósmica en esta región, como se ha llevado a cabo en otras investigaciones en otros lugares (Vega y Manzanares, 2004), con el fin de permitir comparaciones con las predicciones teóricas.

En esta investigación se evalúa la distribución de energía y la tasa de fluidez total para el componente neutrónico a nivel del suelo en función de la altitud. Las mediciones se han realizado durante 2009, en cuatro ubicaciones diferentes entre 22° S y 45° W.

Los datos para estas ubicaciones se presentan en la Tabla 5 y 6. La rigidez de corte y el potencial de modulación solar se calcularon con el programa de la versión 2.15 de EXPACS. Los datos medidos también se comparan con los resultados simulados de EXPACS (Sato y Niita, 2006) y (Vega y Manzanares, 2004).

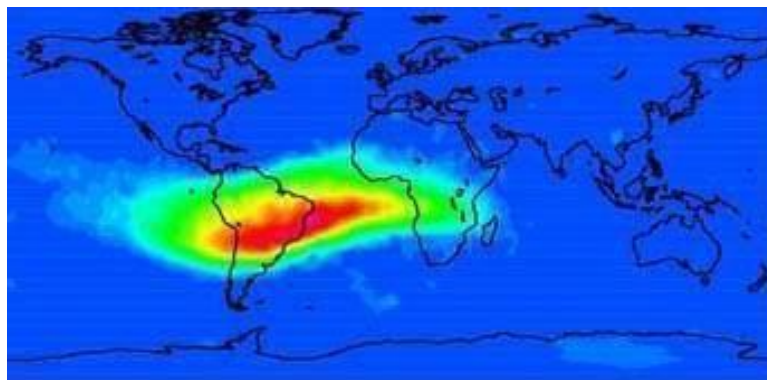


Figura 6. Mapa mundial del campo magnético a 2 km de altitud, obtenido del sistema SPENVIS.

Fuente: (Heynderickx et al., 2004)

Tabla 5. Lugares medidos, con altitud, rigidez de corte y potencial de modulación solar.

Localización	Coordenadas	Altitud (m)	Rigidez de corte(GV)	Potencial de modulación solar(MV)
Ilhabela - SP	23.85° S, 45.42° W	20	9.7	228
San José dos Campos - SP	23.15° S, 45.51° W	680	9.9	228
Itajubá - SP	22.50° S. 45.50° W	1840	10	228
Itatiaia - RJ	22.50° S. 45.50° W	2400	10	238

Fuente: (Federico et al., 2010)

Tabla 6. Resumen de resultados medidos y calculados.

Altitud (m)	Flujos medidos ($10^{-2}n/cm^2s$)	Tasa de recuento (ct/s)	Flujo dado por EXPACS($10^{-2}n/cm^2 s$)		
			Fracción de agua 0.10	Fracción de agua 0.15	Fracción de agua 0.20
20	2.95 ± 0.11	0.0459 ± 0.0111	1.06	0.96	0.89
680	3.53 ± 0.08	0.0501 ± 0.0017	1.83	1.65	1.54
1840	4.52 ± 0.24	0.1156 ± 0.0056	4.38	3.95	3.68
2400	6.39 ± 0.15	0.1580 ± 0.0022	6.42	5.79	5.39

Fuente: (Federico et al., 2010)

2.2.4 Neutrones y espectrometría de Neutrones

Los detectores y la espectrometría de neutrones han jugado un papel esencial en la física nuclear fundamental (interacciones entre nucleones y núcleo, estructura nuclear, mecanismos de las reacciones

nucleares) y en sus aplicaciones (tecnología nuclear de fisión y fusión, física de la materia condensada, radioterapia, radio-protección, medición, etc.) (Aalseth, 2011).

A. Clasificación de neutrones

Las técnicas usadas en espectrometría de neutrones son muy diversas. Se basan en reacciones nucleares, en los retrocesos de los núcleos con los que colisionan, en su tiempo de vuelo y en la difracción en cristales y dependen principalmente del rango energético de los neutrones. Una clasificación clásica según su energía puede ser: lentos, intermedios, rápidos según la cantidad de energía que poseen. En la categoría de neutrones lentos están los neutrones térmicos, cuyo rango de energía es inferior a 1keV. Los intermedios entre 1 y 500keV y los rápidos de 0.5 a más MeV (Angloher, 2012) y (Coron, 2011).

B. Técnicas para la medición de neutrones

B.1. Técnicas basadas en la moderación de neutrones:

Los materiales que contienen hidrógeno, como el polietileno y la parafina, donde los neutrones pierden una importante fracción de energía en una colisión elástica son muy utilizados para moderar los neutrones rápidos y aprovechar la más eficiente detección de los neutrones térmicos. La pérdida de energía será mayor si se aumenta el espesor del moderador para aumentar el número de colisiones previas a la llegada de los neutrones al detector. Para un espesor dado de moderador, los neutrones de baja energía son capturados

antes de penetrar profundamente, en tanto que los neutrones de alta energía no son moderados lo suficiente para una eficiente detección. Entonces eligiendo adecuadamente el tamaño y la composición del moderador, se favorece la detección de distintas regiones de energía. El ejemplo más típico es un conjunto de esferas de polietileno de diferentes diámetros, conocidas como esferas de Bonner (Fixen, 2009).

B.2. Técnicas basadas en reacciones nucleares:

Una aplicación de las reacciones nucleares a la detección de neutrones rápidos es la activación de materiales con reacciones como (n,p) , (n,α) y $(n,2n)$ que precisan una energía mínima o umbral y que, por lo tanto, son insensibles a los neutrones lentos, que se detectaban con capturas exoenergéticas (n,γ) . Las radiaciones emitidas por los núcleos activados permiten estimar el flujo de neutrones e incluso obtener información sobre su dependencia energética. La activación no es una medida en tiempo real, como ya dijimos en el caso de los neutrones lentos, porque necesita un tiempo de irradiación y la medida posterior de la radiactividad acumulada. Las medidas en tiempo real utilizan las reacciones nucleares inducidas por neutrones para medir la energía E_f de las partículas formadas (principalmente partículas alfa y protones) y estimar la energía del neutrón incidente como $E_f - Q$ (Gironnet, 2010).

B.3. Técnicas basadas en la dispersión de neutrones:

Esta técnica, que es la más común, está basada en los retrocesos nucleares producidos por la dispersión elástica de los neutrones con elementos ligeros, usualmente el helio y el hidrógeno, cuya energía cinética de retroceso E_r se absorberá totalmente en el detector debido al pequeño rango de las partículas cargadas pesadas. En el caso más frecuente de colisión no relativista y en el sistema de referencia donde el blanco está en reposo, dado un neutrón con energía cinética E_n , la energía cinética de retroceso E_r varía entre cero y una máxima $E_{rM} = E_n(4A/(1+A^2))$, donde A es el cociente entre la masa que retrocede y la del neutrón (A es aproximadamente igual al número másico del blanco). La eficiencia depende de la sección eficaz de interacción, del estado físico (sólido, líquido o gas) del blanco, del tamaño del detector y, a bajas energías, del umbral de detección E_t porque se pierden todas las señales con $E_r < E_t$ (Larson, 2011).

2.2.5 Método de Montecarlo

El modo Monte Carlo permite encontrar soluciones aproximadas a una variedad de problemas matemáticos a través de la realización de experimentos de muestreo estadístico en una computadora. De manera un tanto sorprendente a primera vista, el método es aplicable a problemas que no tienen absolutamente ningún contenido probabilístico, tanto como a otros cuya estructura es inherentemente estocástica. En general, los métodos numéricos que se basan en el empleo de evaluar n puntos en el seno de un espacio m -dimensional para producir una solución aproximada

tienen un error que decrece con orden $n^{-1/m}$ en el mejor caso, lo que los convierte en extremadamente ineficientes cuando m es alto. En cambio, los métodos de Monte Carlo obtienen estimaciones con un error absoluto del orden $n^{-1/2}$, independientemente de m . Este punto se convierte en la ventaja fundamental del método, que en muchos casos es el único aplicable (Cornejo, 2009) y (Kalos y Whitlock, 2008).

A. Introducción al método Montecarlo

Bajo el método o simulación Montecarlo, hay una serie de procedimientos que analizan las distribuciones de las variables que intervienen directa o indirectamente en un resultado, usando la simulación de números aleatorios. Por esto la simulación de Montecarlo está presente en todos aquellos ámbitos en los que el comportamiento aleatorio o probabilístico desempeña un papel esencial. Con el Método Montecarlo se puede dar solución a una gran cantidad de problemas matemáticos, por medio de experimentos estadísticos realizados en computadora. En estadística los modelos aleatorios generalmente son usados para simular fenómenos que poseen algún componente aleatorio. Pero en el método Montecarlo, la esencia de la investigación es el objeto en sí mismo, un suceso aleatorio o pseudo-aleatorio se usa para estudiar el modelo. La simulación de Montecarlo fue creada para resolver integrales que no se pueden solucionar por métodos analíticos, para ello se usaron números aleatorios que se generaban al azar. Una de las claves del método Montecarlo es crear un modelo matemático del sistema, proceso o actividad, para lo cual se

identifica y analiza cada una de las variables que influyen en el modelo. El comportamiento aleatorio de las variables determina el comportamiento global del sistema. Luego, con la ayuda de un ordenador o PC, se generan valores aleatorios al azar, una vez realizada la generación de datos en “n” veces, se observa el comportamiento del sistema y con base en ello se toman las acciones correctivas para volver a repetir el experimento hasta encontrar una solución (Rubinstein y Kroese, 2008) y (Johansen y Evers, 2011).

B. Pasos para realizar una simulación Montecarlo

Para crear una técnica de simulación Montecarlo, nos guiaremos de los siguientes autores (Faulin, 2009), (Heizer y Render, 2006), (Heizer y Render, 2004) y (Montenegro, 2011) que indican que se deben seguir los siguientes pasos:

- Establecer una distribución de probabilidades en relación con las variables importantes.
- Construir una distribución de probabilidades acumuladas para cada variable.
- Establecer un intervalo de números al azar para cada variable.
- Generar números al azar.
- Simular una serie de ensayos.

2.3 MARCO CONCEPTUAL

Electrón

Partícula elemental con carga eléctrica negativa, que gira alrededor del núcleo del átomo.

Electrón-voltio (eV)

Unidad de energía equivalente a la adquirida por un electrón al trasladarse entre dos puntos con una diferencia de potencial de 1 voltio.

Ion

Átomo o grupo de átomos que, por pérdida o ganancia de uno o más electrones, ha adquirido carga eléctrica.

Neutrón

Partícula elemental sin carga eléctrica, que forma parte del núcleo del átomo.

Protón

Partícula elemental con carga eléctrica positiva, que forma parte del núcleo del átomo.

Sievert (Sv)

Unidad de la dosis equivalente y de la dosis efectiva en el Sistema Internacional de Unidades: $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$.

Dichos conceptos están contenidos (<http://dle.rae.es/?id=XqNLE9W>).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 ÁMBITO O LUGAR DE ESTUDIO.

La presente tesis se realizó en el distrito de Puno, provincia de Puno, departamento de Puno, coordenadas geográficas: $15^{\circ}50'15''S$ $70^{\circ}01'18''O$. A una altura de 3850 msnm.

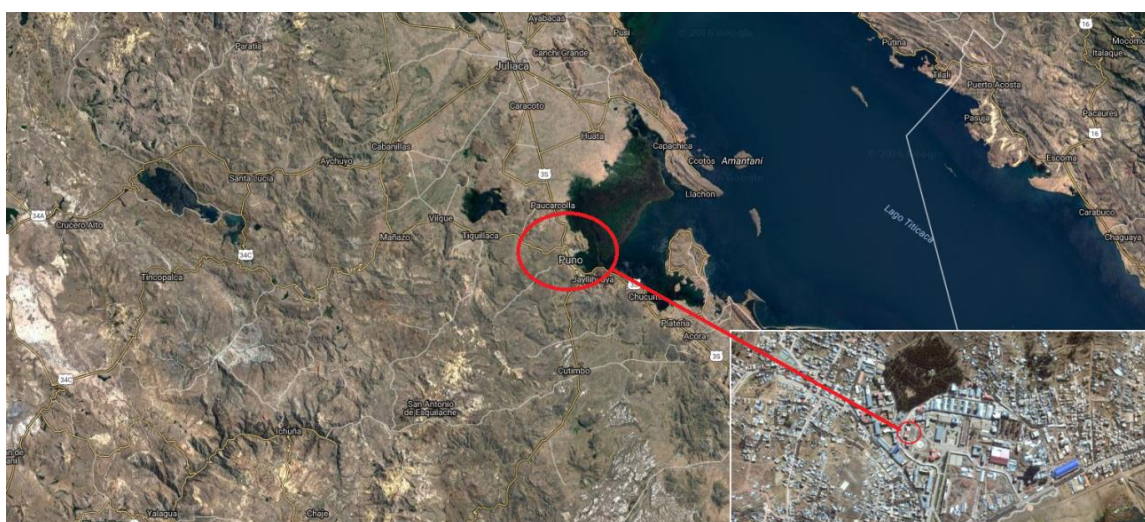


Figura 7. Ubicación geográfica de la ciudad de Puno, provincia de Puno región de Puno.

3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1 Población y muestra.

Debido a que la población es pequeña, los datos tomados del 2 de abril al 2 de agosto del 2016, en tiempos de cada 5 minutos, así como los datos proporcionados para la elaboración del algoritmo en Montecarlo y su respectiva comprobación, se ha considerado todo el universo, en consecuencia, se toma a toda la población.

3.3 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.3.1 Método de Investigación

En el presente trabajo de investigación se utilizó el método científico debido a que se realizó un conjunto de procedimientos que nos permiten alcanzar un conocimiento científico (Tafur, 2005).

3.3.2 Tipo de Investigación

La investigación es de tipo aplicada, pues consiste en el empleo práctico del conocimiento o teorías de radiaciones atmosféricas y algoritmo de Montecarlo con la finalidad de modelar el número de radiaciones y así establecer un punto de partida para determinar el efecto de las radiaciones de neutrones sobre los circuitos integrados. Así también es diacrónica, pues se investiga problemas en una sucesión de momentos temporales a fin de conocer la evolución del comportamiento del problema en un periodo dado, que permita hacer inferencias, respecto al cambio y sus consecuencias (Villalobos, 2008).

3.3.3 Diseño de Investigación

La Investigación es de tipo experimental, ya que es un tipo de investigación que usa la lógica y los principios encontrados en las ciencias naturales. Los experimentos pueden ser llevados a cabo en el laboratorio o en la vida real. Aquí se involucran un número relativamente pequeño de personas, equipos o datos y abordan una pregunta bastante enfocada. Los experimentos son más efectivos para la investigación explicativa y frecuentemente están limitados a temas en los cuales se puede manipular la situación en la cual los datos se hallan (Villalobos, 2008).

3.4 TÉCNICAS, INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS Y DISEÑO ESTADÍSTICO.

3.4.1 Técnicas

La observación: es una técnica de recopilación de datos semi – primaria por la cual el investigador actúa sobre los hechos a veces con la ayuda de algunos instrumentos (Tafur, 2005).

3.4.2 Instrumentos

Los instrumentos son:

Guía de observación de campo: pasos que adopta el investigador a fin de hacer una buena estrategia para observar los hechos (Tafur, 2005).

3.4.3 Técnicas de procesamiento y análisis estadístico

A. Plan de recolección de datos y ejecución

Se siguieron los siguientes pasos para la recolección de datos y ejecución del algoritmo:

Primero: Se recopiló los datos a procesar por el algoritmo.

Segundo: Se realizó la programación en Matlab, para que el algoritmo de Montecarlo determine la cantidad de radiaciones: neutrones en la ciudad de Puno.

Tercero: Se escogió datos de una determinada región: la ciudad de Guadalajara en España para probar el funcionamiento del algoritmo.

Cuarto: Se realizaron las pruebas necesarias: primero con los datos de la región de prueba (grupo de prueba) y posteriormente con los datos de la segunda región extraídos de estudios relacionados (grupo de control).

Para crear la técnica de simulación Montecarlo, se siguieron los siguientes pasos:

Primero: Se estableció una distribución de probabilidades en relación con las variables importantes.

Segundo: Se construyó una distribución de probabilidades acumuladas para cada variable.

Tercero: Se estableció un intervalo de números al azar para cada variable.

Cuarto: Se generaron los números al azar.

Quinto: Se simuló una serie de ensayos.

B. Plan de procesamiento de datos

Para saber la bondad y validez de los valores calculados con los modelos, estos se deben comparar con valores medidos a través de algún índice estadístico. Aquí se mencionan los distintos índices utilizados en este trabajo para comparar los valores de los modelos y las medidas.

Índices estadísticos de distribución, Media aritmética, Desviación estándar, Desviación absoluta promedio, Mediana.

Índices estadísticos de comparación: Desviación Absoluta Media, Error Medio Cuadrado, Porcentaje de Error Medio Absoluto, Porcentaje Medio de Error.

Para correlacionar las variables utilizamos el Coeficiente de correlación de Pearson.

3.5 RECURSOS COMPUTACIONALES Y DE HARDWARE

3.5.1 Para la medida de los neutrones

Se utilizó el detector de neutrones FHT 762 WENDI-2, mostrado en la siguiente figura.



Figura 8. Medidor de neutrones.

Fuente: <https://www.Thermofisher.Com/Order/Catalog/Product/Fht762wendi2>

Sus principales características son:

Tabla 7. Características del Medidor FHT 762 WENDI-2.

Measuring Range (Cf-252)	1 nSv/h - 100 mSv/h (with FHT 642 and FH 40 G)
Sensitivity (Cf-252)	0.84 s-1/(μ Sv/h)
Energy Range	25 meV - 5 GeV according to ICRP 74 (1996)
Angular dependence	± 20 % all directions
Gamma cross-sensitivity	$< 5 \cdot 10^{-5}$ at 100 mSv/h (Cs 137) = i. e. less than 5 μ Sv/h neutron dose rate is displayed
Filling Gas	He-3, 2 bar
Dimensions/Weight	ϕ 230 mm x 340 mm [ϕ 9.1" x 13.4"] / 13.5 kg [29.8 lb]

Fuente: <https://www.Thermofisher.Com/Order/Catalog/Product/Fht762wendi2>

Este tipo de medidor utiliza la técnica basada en la dispersión de neutrones (Fixen, 2009), (Gironnet, 2010) y (Larson, 2011).

3.5.2 Para la elaboración del algoritmo de Montecarlo

- Sistema Operativo de 64 bits Windows 7 Home Premium.
- Microsoft Excel Versión: 2010 14.0.7128.5000 (64 bits).
- Para la realización del programa utilizamos el software Matlab abreviatura de MATrix LABoratory, ("laboratorio de matrices") que es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para los sistemas operativos Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux.

Entre otras Matlab tiene las siguientes ventajas:

- Combina cálculos numéricos, gráficos y programación: potente y fácil de usar.
 - Las cajas de herramientas proporcionan acceso a cientos de rutinas útiles.
 - Uso extendido en la educación de ingeniería.
- (<https://es.mathworks.com/products/matlab.html>).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1.1 Mediciones reales en la ciudad de Puno

Las medidas fueron realizadas del 2 abril del 2016 al 2 agosto 2016 en la ciudad de Puno a una altura de 3850 msnm, con una resolución aproximada de 5 minutos. Esto se hizo para tratar de coincidir con los datos proporcionados por el Neutron Monitor Database (Coron, 2011). Cabe mencionar que todos los valores medidos están contenidos en el Anexo 2.

En la siguiente figura se detallan los valores medidos:

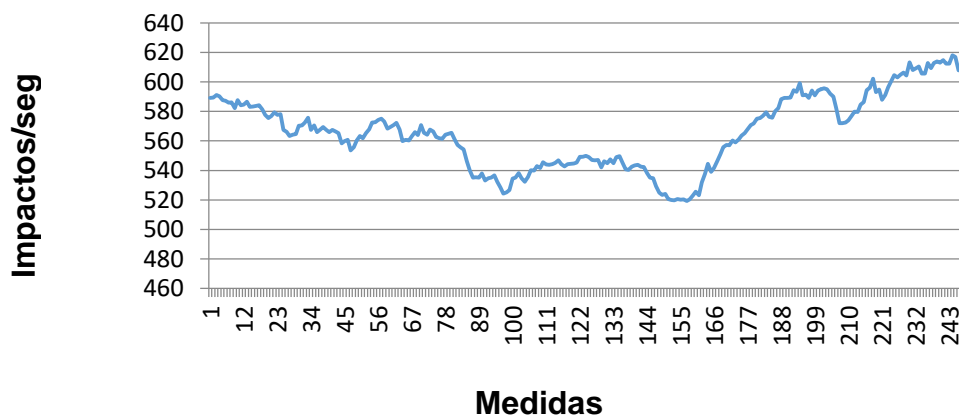


Figura 9. Valores medidos en la ciudad de Puno.

4.1.2 Efectos de las tormentas solares

El número de manchas solares está directamente relacionado a las tormentas solares. De las observaciones realizadas por la National Aeronautics and Space Administration (NASA), estas tormentas solares se presentan aproximadamente cada 11 años (IEEE, 1991), (Bühler et al., 1999), (<http://www.conae.gov.ar/satelites/sac-c.html>) y (Velazco, Fouillat y Reis, 2007). En la figura 10 se muestra la evolución anual de las tormentas solares.

De la figura 10, podemos observar que el último ciclo de radiación fue en el año 2012, lo que coincide con lo mencionado por Hubert et al (2006) en su paper Continuous high-altitude measurements of cosmic ray neutrons and SEU/MCU at various locations: correlation and analyses based-on MUSCA SEP, acerca de los errores producido en los circuitos integrados debido al flujo de neutrones. El siguiente ciclo será aproximadamente en el 2023, por lo que las medidas realizadas en el año 2016, no fueron afectadas por este fenómeno.

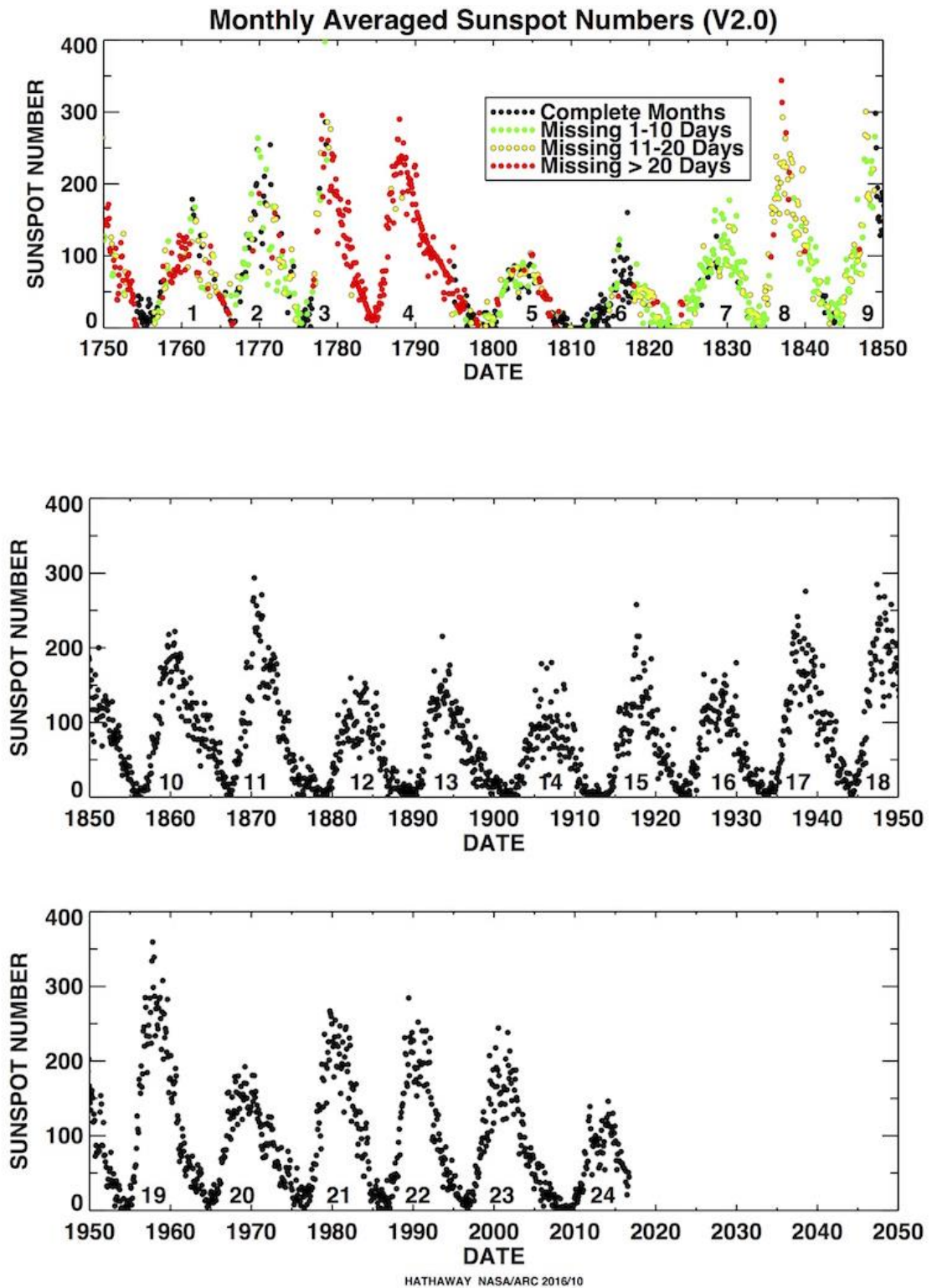


Figura 10. Evolución anual de las tormentas solares.

Fuente: <https://SolarScience.Msfc.Nasa.Gov/Sunspotcycle.Shtml>

4.1.3 Efectos de la anomalía del Atlántico Sur

Al existir pocos datos experimentales para el hemisferio sur y, en particular, para la región SAA, como fue mencionado en la parte del marco teórico, y tomando como referencia las observaciones y modelos del campo magnético que el SAA durante la era del satélite vemos que esta anomalía está creciendo en extensión, se está profundizando y se está moviendo hacia el oeste. El modelo gufm1 muestra que esto ha estado ocurriendo desde 1590 (Heinrich, Roesler y Schraube, 1999), (Sato et al., 2008) y (Florek et al., 1996).

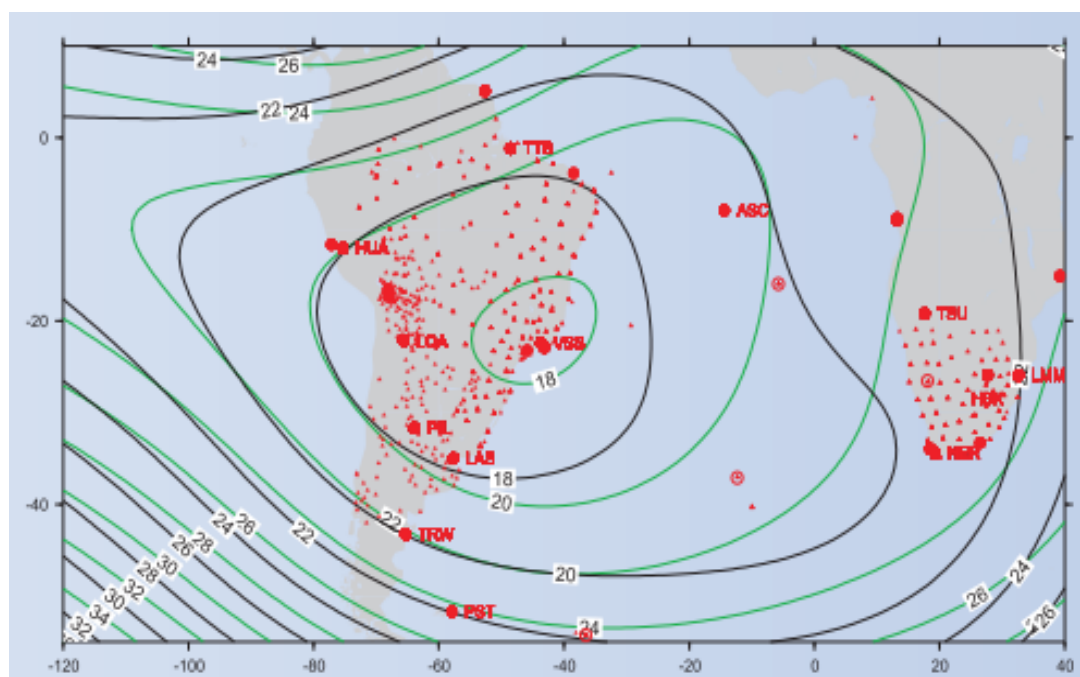


Figura 11. Modelo Gufm Anomalía del Atlántico Sur.

Fuente: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>

De lo anterior podemos deducir que esta anomalía no afecta de manera significativa a las medidas realizadas en la ciudad de Puno, debido a que no estamos en la región de mayor influencia de esta anomalía.

4.1.4 Radiaciones que afectan los Circuitos Integrados

En la última parte del siglo XX, la protección para las tripulaciones aéreas contra los rayos cósmicos ha sido uno de las cuestiones más extensamente discutidas en el ámbito de la dosimetría. Además, la mayor atención ha sido dada a los errores de software en dispositivos semiconductores inducidos por rayos cósmicos incluso a niveles de la superficie terrestre, desde que la miniaturización de los dispositivos determina un gran decrecimiento en sus cargas críticas. Estos efectos de radiación son provocados predominantemente por neutrones producidos por reacciones nucleares entre los rayos cósmicos y los componentes atmosféricos. Por lo tanto, la estimación de los espectros de neutrones de rayos cósmicos en la atmósfera es una cuestión esencial en la evaluación de las dosis de tripulaciones aéreas y las tasas de error suave (SERs). Dentro de la atmósfera y en la superficie terrestre, la incidencia de las fuentes de radiación anteriormente descritas es mucho menor o inexistente, sin embargo, los protones provenientes de rayos cósmicos de alta energía pueden generar otras partículas cuando interaccionan con los núcleos atómicos de la atmósfera, principalmente con los de oxígeno y nitrógeno. Las partículas que se generan son neutrones, protones secundarios, muones y neutrinos, a estas partículas se las denomina también rayos cósmicos secundarios. De todos ellos, la principal fuente de problemas para los circuitos electrónicos son los neutrones a los que se suele llamar neutrones atmosféricos (Salazar, 2013), (Aoki, 1982) y (Norman, 2004).

El flujo de neutrones varía mucho con la altitud (Dodd, 2003). A nivel de tierra, el flujo observado es unas 400 veces menor que a unos 9 km de altura, sin embargo, su espectro de energía es prácticamente igual (Normand, 2004). Desde hace años, los neutrones atmosféricos son objeto de estudio especialmente por parte de los fabricantes de aviones y circuitos integrados.

Esto lo podemos corroborar a partir de los siguientes artículos de investigación que mencionan:

Los efectos de evento únicos (SEE) inducidos por partículas (iones pesados, neutrones, protones...) presentes en el espacio y en los ambientes naturales atmosféricos donde operan los dispositivos electrónicos son bien conocidos hace algunos años. Los neutrones y los protones pueden indirectamente inducir errores creando iones secundarios tras una reacción nuclear con el núcleo del circuito integrado. Los portadores generados por iones primarios o secundarios son recogidos por la región de agotamiento dando como resultado un impulso de corriente.

Los artículos recientes (Heidel et al., 2008), (Hubert et al., 2009), (Heidel et al., 2008), (Heidel et al., 2009), (Lawrence et al., 2009), (Hubert et al., 2009) y (Siervawski, 2009) han confirmado la sensibilidad de SEU de los dispositivos de nano escala a la ionización directa del protón. Las partículas emitidas a partir de la radiación cósmica primaria (principalmente los protones) que golpean la atmósfera de la tierra dan lugar a un campo complejo de partículas secundarias. Estas partículas

incluyen neutrones, protones, muones, piones, etc. Las partes y sistemas electrónicos están expuestos a los flujos de la radiación ionizante que dependen fuertemente de la altitud, la latitud, la longitud y la actividad del Sol. Las causas del SEE en dispositivos de nano escala expuestos al ambiente atmosférico son neutrones, protones y partículas alfa.

Las tecnologías de los dispositivos semiconductores que se reducen por debajo de los 90nm, inducen nuevas problemáticas como la ionización directa de protones y la ionización radial que afectan los SEE (Raine et al., 2011), (Raine et al., 2012) y (Raine et al., 2011). Por lo tanto, neutrones terrestres y protones que inducen SEU son una de las cuestiones clave que pueden ser un gran desafío en la fabricación de las futuras tecnologías nanométricas. Particularmente, se investigan principalmente los MCU (Multi-Cell Upset) que se definen como errores simultáneos inducidos por un solo evento en más de una celda de memoria. Por lo tanto, la determinación de la tasa de error suave (SER) sigue siendo un desafío para evaluar la sensibilidad de la tecnología y para extrapolar las tendencias para futuras generaciones de dispositivos. Diversas simulaciones y enfoques experimentales se encuentran en la literatura para estimar el SER inducido por medio de neutrones terrestres: pruebas con aceleradores utilizando partículas alfa, neutrón o protones; medidas en la vida real aplicadas en ambientes naturales (Peronnard, Velazco y Hubert, 2009), (Puchner, 2011), (Sato y Niita, 2006), (Autran et al., 2007) y (Torok, Platt y Cai, 2007) y la combinación de métodos experimentales y de simulación (Chawick y Normand, 1999).

Los eventos inducidos por las partículas en los componentes electrónicos (Single Events) son bien conocidos desde hace muchos años. Los iones pesados son ionizantes y crean cargas en el silicio, cuya densidad depende de la "LET" (transferencia de energía lineal) del ion. Los neutrones no tienen energía ionizante directa, y el protón LET es muy pequeño. Pero los neutrones y los protones pueden inducir indirectamente eventos únicos creando iones ionizantes secundarios después de una reacción nuclear con un núcleo de los materiales componentes. Los iones pesados y los protones son responsables de los efectos en aplicaciones espaciales.

Los errores inducidos por neutrones están ahora bien identificados como una preocupación real, no sólo para la aviación (Taber, 1993) y (Gossett, 1993), sino también a nivel del suelo (Ziegler, 1996) y (Normand, 1996) en las aplicaciones de productos básicos. Las cargas resultantes de iones secundarios y recogidas por la región de agotamiento del circuito integrado pueden invertir el contenido de células de memoria (SEU, Single Event Upset) o provocar un impulso transitorio dentro de un circuito combinacional. Debido a la naturaleza estadística de la interacción nuclear, los cálculos de las tasas de error suave (SER) sigue siendo un desafío, especialmente en los circuitos integrados complejos.

Por lo que podemos indicar que los neutrones son una buena alternativa para la medida del efecto de las radiaciones sobre los Circuitos integrados en ciudades de altura como es Puno.

4.1.5 Algoritmo de Montecarlo e implementación del programa en Matlab

A. Consideraciones prácticas para la elaboración del programa:

Para la realización del programa en Matlab utilizaremos el siguiente diagrama de flujo:

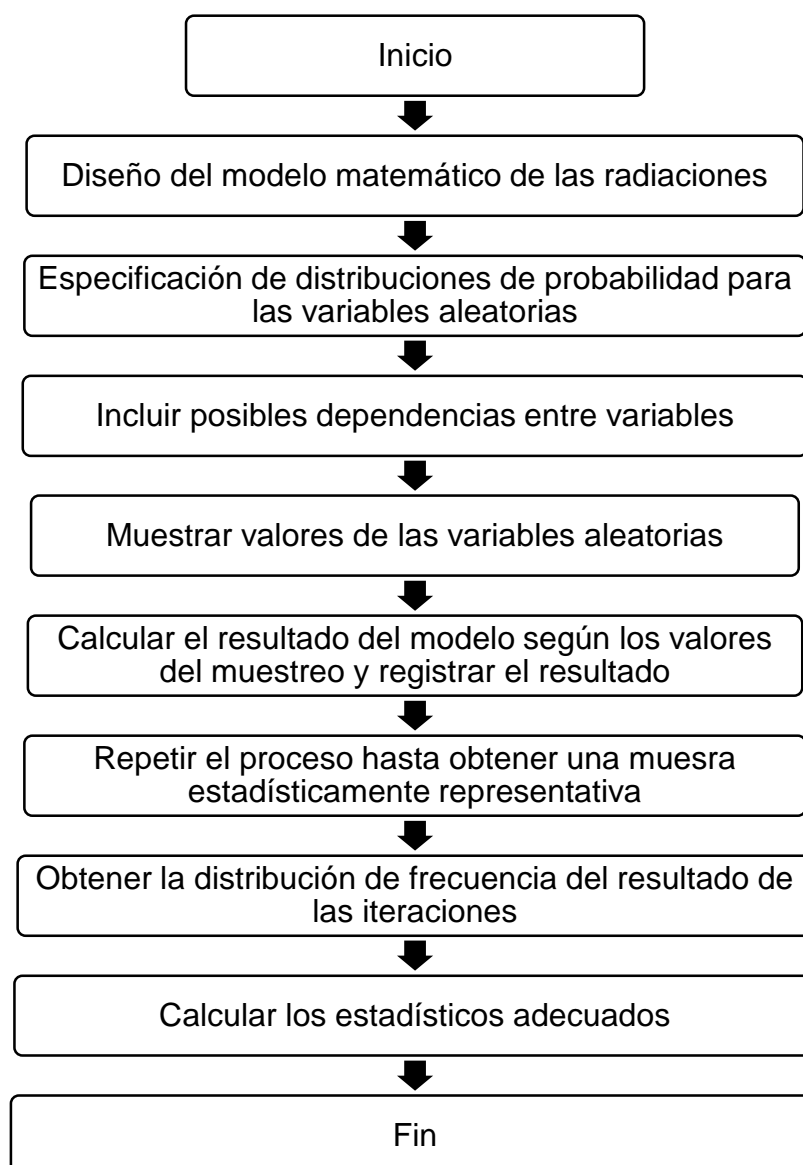


Figura 12. Diagrama de flujo del programa.

B. Resultados obtenidos para el modelo implementado en Montecarlo

Para determinar la precisión del modelo se realizaron las simulaciones con ayuda de los datos obtenidos por la MNDB en las ciudades de Guadalajara, Oulo y Puno (valores reales tomados en el experimento). Tomando como parámetros 100, 1000 y 100000 trials o ensayos:

A continuación, se muestra parte del código programa:

```

1  #include <stdlib.h>
2  #include <stdio.h>
3  #include <math.h>
4  #include <string.h>
5  #define SEED 35791246
6
7  main()
8  {
9      int niter=0;
10     double x,y;
11     int i,count=0; /* # of points in the 1st quadrant of unit circle */
12     double z;
13     double v;
14
15     printf("Enter the number of iterations used to estimate PUNO imp/sec: ");
16     scanf("%d",&niter);
17
18     /* initialize random numbers */
19     srand(SEED);
20     count=0;
21     for ( i=0; i<niter; i++) {
22         x = (double)rand()/RAND_MAX;
23         y = (double)rand()/RAND_MAX;
24         z = x*x+y*y;
25         if (z<=1) count++;
26         printf("count= %d , x= %g , y= %g , z= %g \n",count,x,y,z);
27     }
28     v=(double)count/niter*720;
29     printf("# of trials= %d , estimate of PUNO imp/sec is %g \n",niter,v);
30 }

```

Figura 13. Algoritmo de Monte Carlo – C Test – PUNO – Code.

En la siguiente figura se muestran los resultados para 100, 1000 y 100000 trials.

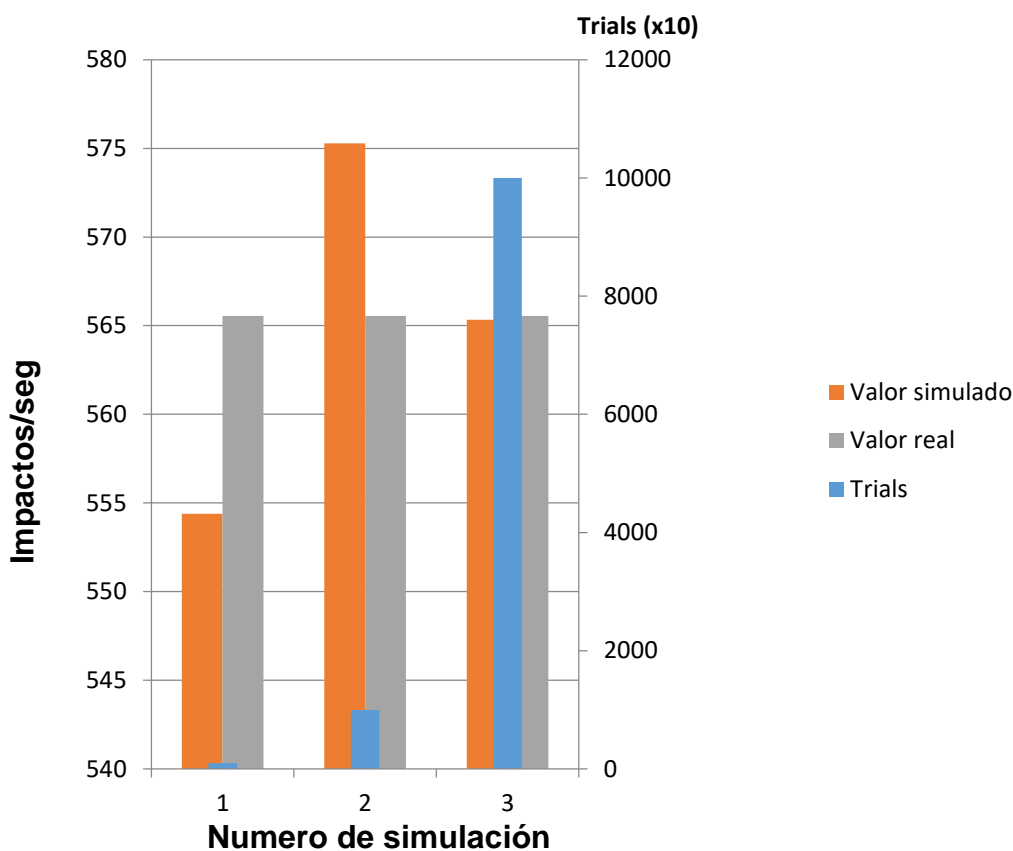


Figura 14 .Resultados de la simulación en Montecarlo para la ciudad de Puno.

4.1.6 Comparación de los valores obtenidos en la simulación con los valores reales obtenidos en la ciudad de Puno y los valores de las ciudades de Guadalajara España y Oulu Finlandia

Tabla 8. Valores promedios obtenidos por Montecarlo.

	Perú Puno (impactos/seg)	España Guadalajara (impactos/seg)	Finlandia Oulu (impactos/seg)
Promedio	565.5583161	71.78944797	107.4313675

Algoritmo de Monte Carlo – MatLab Test

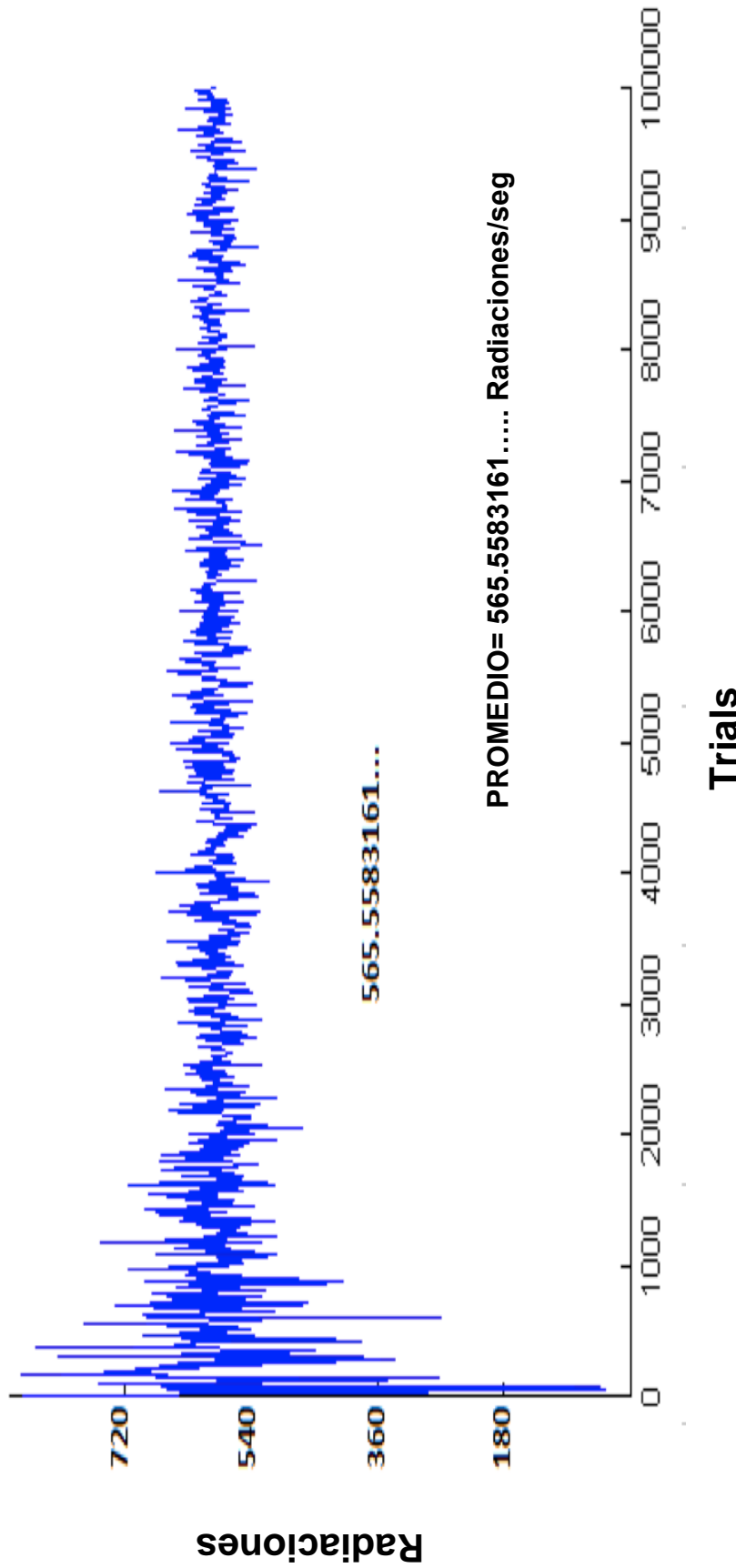


Figura 15. Aproximación por Montecarlo al valor promedio de Puno.

4.1.7 Valores estadísticos obtenidos e interpretación de datos

Para determinar la validez de los valores calculados con el Modelo de Montecarlo, se contrastaron con los valores reales tomados en la ciudad de Puno del 2 de abril al 2 de agosto del 2016. Los resultados se muestran en la siguiente figura:

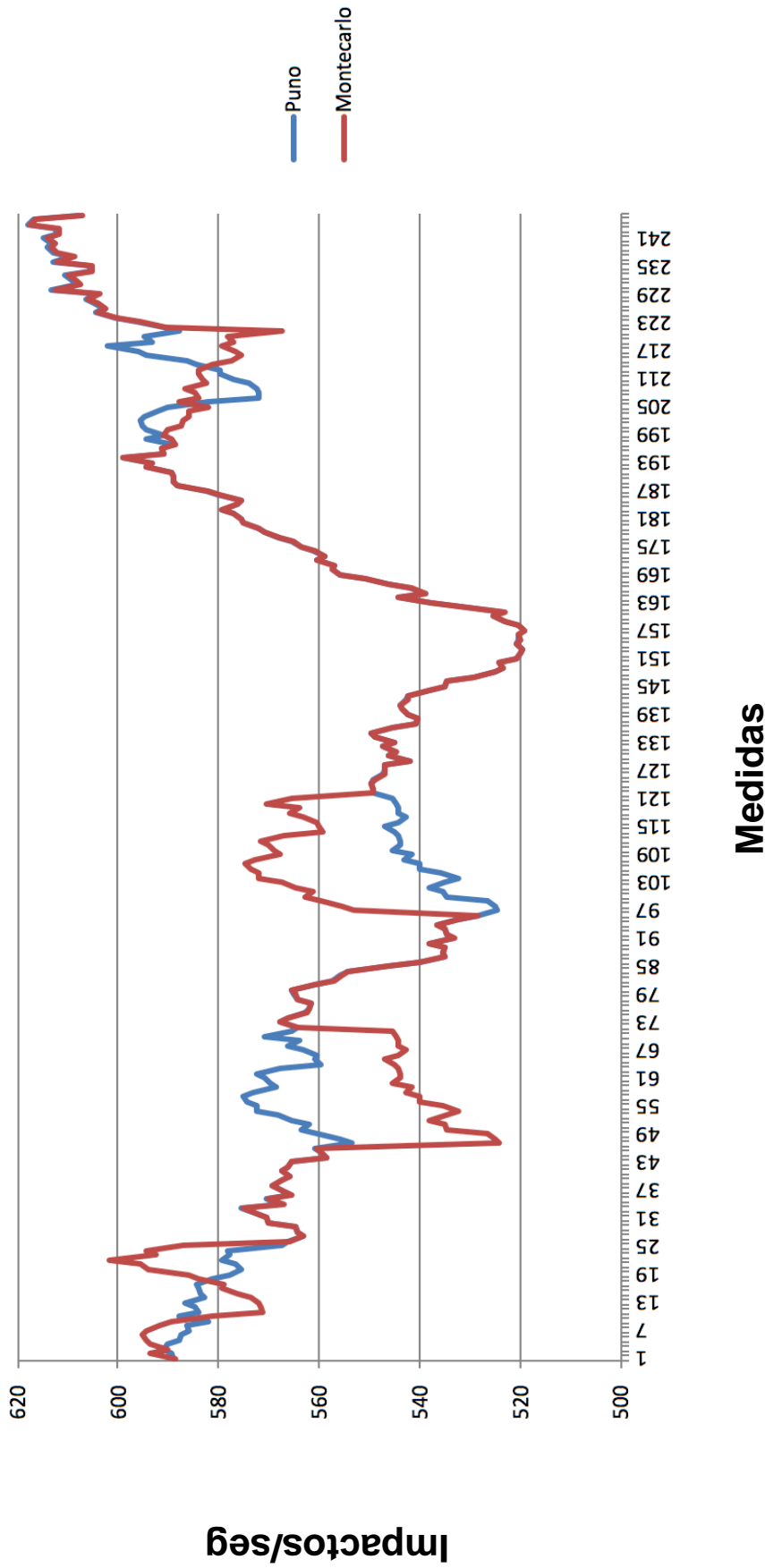


Figura 16. Mediciones realizadas y valores proporcionados por el modelo de Montecarlo en Puno del 2 de abril al 2 de agosto del 2016

Para determinar la validez del modelo obtenido mostramos en la siguiente tabla nuestros estadísticos correspondientes:

Tabla 9. Estadísticos obtenidos.

Estadístico	Puno	Montecarlo
Media aritmética	565,55832	565,33698
Desviación estándar	24,83805	24,68560
Desviación absoluta promedio	20,47608	20,34983
Mediana	566,01400	565,72974

De los resultados de la tabla notamos que la medida de tendencia central media aritmética entre los datos reales y los simulados sólo difiere en 0.04%. De la misma forma las medianas sólo difieren en 0.05%. Así mismo las desviaciones estándar y absoluta de promedios para ambas poblaciones: reales y simuladas es casi la misma por lo que la variabilidad de los valores nos indica su similitud.

Así mismo aplicando los estadísticos de comparación para comprobar los errores de pronóstico se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 10. Estadísticos de comparación obtenidos.

Estadístico de comparación	Valor (Impactos/seg)
Desviación Absoluta Media	7,446271528
Error Medio Cuadrado	178,689365912
Porcentaje de Error Medio Absoluto	0,013275257
Porcentaje Medio de Error	0,000092217

La desviación absoluta media es de 7,44627 que es una medida más utilizada para evaluar el error del pronóstico.

Como error medio cuadrático tenemos 178,6893. Ambos parámetros no se pueden comparar entre ellos, pero sirven para comparar dos o más métodos de pronóstico. Pero en este caso sólo tenemos un método, por lo que sólo lo referenciaremos.

Como porcentaje medio de error, en donde no se utiliza el valor absoluto de los errores si no se consideran los signos tenemos que es 0,01%. Cabe mencionar que esta medida no es muy recomendada por que se anulan los errores con signos diferentes.

Pero el porcentaje de error medio absoluto que nos indica que sólo existe en promedio un error aproximado entre las medidas reales y las simuladas por Montecarlo en 1,33%.

Por último, para cuantificar si las dos variables están correlacionadas (valores reales y valores calculados por la simulación de Montecarlo) calculamos el coeficiente de correlación de Pearson (o simplemente coeficiente de correlación) r , que varía de -1 a 1. La correlación es máxima si r vale -1 ó 1 y nula si r es 0. Para los valores obtenidos tenemos un coeficiente de correlación de 0.853748201, lo que indica una correlación positiva alta.

4.1.8 Prueba de hipótesis

Hipótesis 2.- El algoritmo de Montecarlo modela la radiación que afecta a los circuitos integrados.

El sentido de esta hipótesis nos lleva a contrastarla en dos hipótesis:

Hipótesis Nula: Es probable que, gracias al algoritmo estadístico de Montecarlo, se podrá elaborar un modelo predictivo de la cantidad de radiaciones en la ciudad de Puno.

Hipótesis Alternativa: No es probable que, gracias al algoritmo estadístico de Montecarlo, se podrá elaborar un modelo predictivo de la cantidad de radiaciones en la ciudad de Puno.

Del análisis ANOVA se muestra:

Del análisis de varianza realizado a un nivel de significancia del 5%, se muestra que existe evidencia estadística significativa entre la diferencia de tratamiento. Dado que el valor de probabilidad es menor que 3,89 [$F(2,490, 0,05) = 3,89$], en este caso es de 0.098%, por lo que podemos asumir que no se rechaza la hipótesis, por lo tanto, con ayuda del algoritmo estadístico de Montecarlo, se logró elaborar un modelo predictivo de la cantidad de radiaciones en la ciudad de Puno.

Tabla 11. Análisis ANOVA.

FUENTE	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADO MEDIO	F
Factor	6,025536239	1	6,025536239	0,009827121
Error	300445,3426	490	613,1537604	

Sabemos que el valor crítico al 5% de rechazo es 3,89 y el valor crítico obtenido es de 0.009827121, que se encuentra más a la izquierda, por lo que se acepta la hipótesis planteada.

CONCLUSIONES

- Se analizó las distintas radiaciones atmosféricas que afectan los circuitos integrados llegando a inducir que los neutrones son una buena alternativa para la medida del efecto de las radiaciones en ciudades de altura como es Puno.
- Con el objetivo de desarrollar el modelo de Montecarlo para predecir el número de radiaciones: neutrones en la ciudad de Puno, se ha desarrollado en Matlab. Obteniendo un promedio de error aproximado entre las medidas reales y las simuladas de 1,33%; el coeficiente de correlación de Pearson el que nos dio un valor de 0,8537 lo que nos indica una correlación positiva alta.

RECOMENDACIONES

- El manejo del sistema implementado en Montecarlo puede ser utilizado por cualquier persona interesada, en conocer más acerca del modelamiento de número de radiaciones en la ciudad de Puno. Así mismo la aplicación del Algoritmo de Montecarlo puede ser utilizado en diversos aspectos del conocimiento humano.
- Para realizar más pruebas reales se debe tener en cuenta la realización de las medidas del número de radiaciones en función de una línea base. Debido a que en la realidad no existen observatorios en América Latina sería una alternativa implementar uno en la ciudad de Puno en colaboración con Universidad o institutos especializados en el tema.

BIBLIOGRAFÍA

- Aalseth, C. (2011). Results from a Search for Light-Mass Dark Matter with a p-Type Point Contact Germanium Detector, *Physical Review Letters*. (106).
- Angloher, G. (2012). Results from 730 kd days of the CRESST-II dark matter search. *The European Physical Journal*.
- Aoki, S., Kinoshita, H., Guinot, B., Kaplan, G.H., McCarthy, D.D., Seidelmann, P.K. (1982). The new definition of universal time. *Astronomy and Astrophysics* 105 (2), 359 – 361.
- Autran, J., Roche, P., Borel, J., Sudre, C., Castellani-Coulié, K., Munteanu, D., Parrassin, T., Gasiot, G., and Schoellkopf J. (2007). Altitude See Test European Platform (Astep) and First Results in CMOS 130 nm SRAM. *IEEE Transaction on Nuclear Science*. 54 (4).
- Benestad, R. (2006). *Solar Activity and Earth's Climate*. Editorial Springer – Velag Berlin Heidelber – Alemania. (2), 1 – 316.

- Bertotti, B., Farinella, P., y Vokrouhlický, D. (2003). *Physics of the Solar System, Dynamics and Evolution, Space Physics and Spacetime Structure*. Editorial Springer Netherlands. 293 (1), 695 – 706.
- Binder, D., Smith, E., and Colman, A. (1975). Satellite Anomalies from Galactic Cosmic Rays. *IEEE Transaction on Nuclear Science*. (22), 2675 – 2680.
- Brugger, M. (2014). R2E and Availability. *Mitigation Project CERN, Ginebra Suiza*. 1 – 12.
- Bühler, P., Ljungfelt, S., Mchedlishvili, M., Schlumpf, N., Zender, A., Adams, L., Daly, E. y Nickson, R. (1999). Radiation Environment Monitor. *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research*. 386 – 825.
- Chawick, M. y Normand, E. (1999). Use of New Endf/B-Vi Proton and Neutron Cross Section for Single Event Upset Calculations. *IEEE Transaction on Nuclear Science*. 46 (6), 1386.
- Chen, J. y Garren, D. (1993). Interplanetary Magnetic Clouds: Topology and Driving mechanism. *Geophysical Research Letters*. 2319 – 2322.
- Cornejo, N. (2009). Desarrollo de un Código de Simulación por Monte Carlo para la Calibración de Sistemas de Detección en Espectrometría de Radiación Gamma. *Tesis Universidad de Extremadura – España*. 199 – 220.
- Coron, N. (2011). Measurement of the differential neutron flux inside a lead shielding in a cryogenic experiment. *12th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics - Munich, Alemania*.

- Ditcher, B., Macgarity, J., Oberhardt, M., Jordanov, V., Sperry, D., Hubert, A., Pantazis, J., Mullen, E., Ginet, G. and Gussenhoven, M. (1998). Compact Environmental Anomaly Sensor: A Novel Spacecraft Instrument for in Situ Measurements of Environmental Conditions. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 45 (6).
- Dodd, P. y Massengill, L. (2003). Basic Mechanisms and Modeling of Single-Event Upset in Digital Microelectronics. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 50 (3), 583 – 602.
- Faulin, J. (2009). Simulación Montecarlo con Excel. http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Simulacion_MC.pdf, enero, 2009.
- Faure, G. y Mensing, T. (2007). *Introduction to Planetary Science, The Geological Perspective*. Editorial Springer Netherlands. (1), 220 – 510.
- Federico, C., Gonzalez, O., Fonseca, E., Martin, I. y Caldas L. (2010). Neutron Spectra Measurements in the South Atlantic Anomaly Región. *Radiation Measurements Journal*. (45), 1526 – 1528.
- Fixen, D. (2009). The temperature of the cosmic microwave background. *The Astrophysical Journal*. 916 – 920.
- Florek, M., Masarik, J., Szarka, I., Nikodemova, D., Hrabovcova, A. (1996). Natural neutron fluence rate and the equivalent dose in localities with different elevation and latitude. *Radiation Protection Dosimetry Journal*. 67 (3), 187 – 192.
- Freeman, J. (2002). *Tormentas en el Espacio*. Editorial Cambridge University Press – Inglaterra.

- Friis-Chistensen, E., Fröhlich, C., Haigh, J., Schüssler, M. y Von Steiger, R. (2008). The Tunguska Mystery. *Scientific American Journal*. 80- 86.
- García, R. (2014). Radiation Fields in High Energy Accelerators and their Impact on Single Event Effects. *Thesis CERN Francia*. 190 - 191.
- Gironnet, J. (2010). Spectrometrie de neutrons rapides par bolometres cible lithium pour la reduction du fond des experiences de detection directe de matiere noire. *Ph.D. dissertation, L'Université Paris Sud II U.F.R Scientifique d'Orsay, France*.
- Goldhagen, P., Reginatto, M., Kniss, T., Wilson, J., Singleterry, R., Jones, I. y Van Steveninck, W. (2002). Measurement of the energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons aboard an ER-2 high-altitude airplane. *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research*. 476 (1-2), 42 – 51.
- Gossett, C. (1993). Single Event Phenoma in Atmospheric Neutron Environments. *IEEE Transactions Nuclear Science*. 40 (6), 1845.
- Heidel, D. (2009). Single-Event Upsets and Multiple-Bit Upsets on a 45 nm SOI SRAM. *NSREC09 IEEE Nuclear & Space Radiation Effects Conference*.
- Heidel, D., Marshall, P., Label, K., Schwank, J., Rodbell, K., Hakey, M., Berg, M., Dodd, P., Friendlich, M., Phan, A., Seidleck, C., Shaneyfelt, M. y Xapsos, M. (2008). Low Energy Proton Single-Event-Upset Test Results on 65nm SOI SRAM. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 55 (6), 3394 – 3400.
- Heidel, D., Rodbell, K., Cannon, E., Cabral, C., Gordon, M., Oldiges, P. y Tang, H. (2008). Alpha-Particle-Induced Upsets in Advanced CMOS Circuits and Technology. *IBM Journal of Research and Development*. 52 (3), 225 - 232.

- Heinrich, W., Roesler, S. y Schraube, H. (1999). Physics of cosmic radiation fields. *Radiation Protection Dosimetry Journal*. 86(4), 253 – 258.
- Heizer, J. y Render, B. (2006). *Dirección de la Producción Decisiones Tácticas*. Editorial Prentice Hall, Madrid, España. (6), 43, 44, 52, 127, 129, 440.
- Heizer, J. y Render, B. (2004). *Principio de Administración de Operaciones*. Editorial Pearson – México (5), 106, 110, 118, 452, 457, 463, 490, 500.
- Heynderickx, D. (2002). Review on Modeling of the Radiation Belts. *International Journal of Modern Physics*. (17), 1675.
- Heynderickx, D., Quaghebeur, B., Wera, J., Daly, E. y Evans, H. (2004). New Radiation Environment and Effects Models in the European Space Agency's Space Environment Information System (SPENVIS). *Space Weather An Agu Journal*. 2 (10).
- Hongyu, L. (2013). Neutron beam monitoring for single-event effects testing. *Thesis Doctoral University of Central Lancashire – Inglaterra*.
- <http://dle.rae.es/?id=XqNLE9W>
- <http://www.conae.gov.ar/satelites/sac-c.html>
- <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>
- <https://Solarscience.Msfc.Nasa.Gov/Sunspotcycle.Shtml>
- https://Stereo.Gsfc.Nasa.Gov/Spaceweather/Swpost_Sp.Pdf
- https://Stereo.Gsfc.Nasa.Gov/Spaceweather/Swpost_Sp.Pdf
- <https://www.Thermofisher.Com/Order/Catalog/Product/Fht762wendi2>

Hubert, G., Duzellier, S., Boatella-Polo, C., Bezerra, F. y Ecoffet R. (2009). Musca Sep³ Contributions to Investigate the Direct Ionization Proton Upset in 65nm Technology for Space and Atmospheric and Ground Applications. *IEEE Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), European conference Ginebra – Suiza.*

Hubert, G., Duzellier, S., Inguibert, C., Boatella-Polo, C., Bezerra, F. and Ecoffet, R. (2009). Operational SER Calculations on the SCA-C Orbit Using the Multi-Scales Single Event Phenomena Predictive Platform (Musca Sep³). *IEEE Transactions on Nuclear Science.* 56 (6), 3032 – 3042.

Hubert, G., Velazco, R., Federico, C., Cheminet, A., Silva-Cardenas, C., Caldas, L., Pancher, F., Lacoste, V., Palumbo, F., Mansour, W., Artola, L., Pineda, F. and Duzellier, S. (2013). Continuous high-altitude measurements of cosmic ray neutrons and SEU/MCU at various locations: correlation and analyses based-on MUSCA SEP³. *IEEE Transactions on Nuclear Science.* 60 (4), 2418 – 2426.

IEEE (1991). Solar Effects on Communications. *IEEE Power Engineering Review.* 11 (9), 6 – 11.

Johansen, A. y Evers, L. (2011). Simulation and the Monte Carlo Methods. *Lecture Notes, University of Bristol – Inglaterra.*

Kalos, M. y Whitlock, P. (2008). *Monte Carlo Methods.* Editorial Wiley. (2), 85 – 178.

Klahr, H., y Brandner, W. (2006). *Planet Formation. Theory, Observations and Experiments.* Editorial Cambridge University – Inglaterra. 147 – 160.

- Kowatari, M., Nagaoka, K., Satoh, S., Ohta, Y., Abukawa, J., Tachimori, S. and Nakamura, T. (2005). Evaluation of the altitude variation of the cosmic-ray induced environmental neutrons in the Mt. Fuji area. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 42 (6), 495 – 502.
- Ladbury, R., Benedetto, J., Mcmorrow, D., Buchner, S., Label, K., Berg, M, Kim, H., Sanders, A., Friendlich, M., and Phan, A. (2009). TPA Laser and Heavy-Ion See Testing: Complementary Techniques for SDRAM Single-Event Evaluation. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 56 (6), 3334 – 3340.
- Larson, D. (2011) Seven-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Power Spectra and WMAP-Derived Parameters. *The Astrophysical Journal Supplement*. 192 (2), 16 – 19.
- Lawrence, R., Ross, J., Haddad, N., Reed, R. and Albrecht D. (2009). Soft Error Sensitivities in 90nm Bulk CMOS SRAMs. *IEEE Radiation Effects Data Workshop USA*.
- Lemos, R. (2004). Reference Neutron Spectra Measurements with a Multisphere Bonner Spectrometer. *Tesis para el grado de maestro, Institute of Radioprotection and Dosimetry, Rio de Janeiro, Brazil*.
- McCracken, K., Beer, J. y McDonald, F. (2002). A Five-Year Variability in the Modulation of the Galactic Cosmic Radiation over Epochs of Low Solar Activity. *Journal Geophysical Research Letters*. (29), 14 – 19.
- McFadden, L., Weissman, R. y Johnson, T. (2007). *Encyclopedia of the Solar System*. Editorial Academic Press. (2), 561 – 585.

- Mendoza, B. (2006). Efectos de la Actividad Solar en el Clima Terrestre. *Monografía del Instituto de Geofísica, UNAM – México.*
- Mendoza, B. (2013). Introducción a la Física Espacial. México. *Monografía del Instituto de Geofísica, UNAM – México.*
- Montenegro, R. (2011). Diseño e Implementación de un Sistema de Inventarios, Aplicando Simulación Montecarlo, en una Empresa de Servicios Petroleros. *Tesis para optar el grado de maestro, Universidad Politécnica Nacional Quito – Ecuador.*
- Noh, J. (2015). Study of Neutron Soft Error Rate (SER) Sensitivity: Investigation of Upset Mechanisms by Comparative Simulation of FinFET and Planar MOSFET SRAMs. *IEEE Nuclear and Plasma Sciences Society.* 62 (4), 1642 – 1649.
- Norman, E. (2004). Single Event Effects in Avionics and on the Ground. *International Journal of High Speed Electronics and System.* 14 (2), 285 – 298.
- Normand, E. (1996). Single Event Upset at Ground Level. *IEEE Transactions on Nuclear Science.* 43 (6), 2742 - 2750.
- Oldham, T., Friendlich, M., Sanders, A., Seidleck, C., Kim, H., Berg, M., and Label, K. (2009). Tid and See Response Of Advanced Samsung and Micron 4g Nand Flash Memories for the Nasa MMS Mission. *IEEE Radiation Effects Data Workshop, Quebec Canadá.* 114 – 122.
- Peronnard, P., Velazco, R. y Hubert, G. (2009) Real-Life SEU Experiments on 90nm Srams in Atmospheric Environment: Measures vs. Predictions done

- by Means of Musca Sep3 Platform. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 56 (6), 3450 – 3455.
- Puchner, H. (2011). Correlation of Life Testing to Accelerated Soft Error Testing. *IEEE 3rd Annual Ser Workshop, San Jose – Costa Rica*.
- Raine, M., Hubert, G., Gaillardin, M., Artola, L., Paillet, P., Girard, S., Sauvestre, J. y Bournel, A., (2011). Impact of the Radial Ionization Profile on See Prediction for SOI Transistors and SRAMs Beyond The 32-nm Technological Node. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 58 (3), 840 - 847.
- Raine, M., Hubert, G., Gaillardin, M., Paillet, P. y Bournel, A. (2011). Monte Carlo Prediction of Heavy Ion Induced MBU Sensitivity for SOI SRAMs using Radial Ionization Profile. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 58 (6), 2607 – 2613.
- Raine, M., Hubert, G., Gaillardin, M., Paillet, P. y Bournel, A. (2012). Implementing Realistic Heavy Ion Tracks in a See Prediction Tool: Comparison between Different Approaches. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 59 (4), 950 – 957.
- Reed, R. (2007). Impact of Ion Energy and Species on Single Event Effects Analysis. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 54 (6), 2312 – 2321.
- Rodriguez, A. (2007). Estudio y Ensayo de un Circuito Digital para una Prueba en Radiación Ionizante. *Proyecto de fin de Carrera de Telecomunicaciones Universidad de Sevilla – España*. 17 - 20.

- Rubinstein, R. y Kroese, D. (2008). *Simulations and the Monte Carlo Method*.
Editorial Wiley – USA. (2), 256 – 312.
- Russell, C. (2000). The Solar Wind Interaction with the Earth's Magnetosphere:
A Tutorial. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 28 (6), 1818 – 1830.
- Salazar, D. (2013). Diseño y Caracterización de un Monitor de Radiación para
Aplicaciones Espaciales. *Tesis para optar el grado de Maestro, Universidad
Nacional del Cuyo, Mendoza Argentina*. 1 – 5.
- Sanchez, E. y Tartagliones, A. (2010). ACTA Project MARE Monitor Argentino
de Radiación Espacial: Development Model Design Report. *Documento
ACTA – MARE – 04B*.
- Sato, T. y Niita, K. (2006). Analytical functions to predict cosmic-ray neutron
spectra in the atmosphere. *Radiation Research Society*. (166), 544 – 555.
- Sato, T., Yasuda, H., Nitta, K., Endo, A. and Sihver, L. (2008). Development of
PARMA: PHITS-based analytical radiation model in the atmosphere.
Radiation Research Society. 170 (2), 244 – 259.
- Sierawski, B. (2011). The Role of Single.charged Particles in Microelectronics
Realibility. *Tesis Doctoral University of Vanderbilt – Tennessee – USA*.
- Sierawski, B. (2014). Bias Dependence of Muon-Induced Single Event Upsets in
28 nm Static Random Access Memories. *IEEE Reliability Physics
Symposium, Waikoloa – USA*.
- Sierawski, D., (2010). Muon-Induced Single Event Upsets in Deep-Submicron
Technology. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 57 (6), 3273 – 3278.

- Siervawski, B., (2009). Impact of Low-Energy Proton Induced Upsets on Test Methods and Rate Predictions. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 56 (6), 3085 – 3092.
- Taber, A. (1993). Single Event Upsets in Avionics. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 40 (6), 74 – 77.
- Tafur, R. (2005). *La Tesis Universitaria*. Editorial Mantaro - Lima.
- Tang, H. and Cannon, E., (2004). SEMM-2: A Modeling System for Single Event Upset Analysis. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 51 (6), 3342 – 3348.
- Torok, Z., Platt, S. y Cai, X. (2007). See-Inducing Effects of Cosmic Rays at the High-Altitude Research Station Jungfrauoch Compared to Accelerated Test Data. *Radiation and Effects on Components and System 9th European Conference – Francia*.
- Vega, H. y Manzanares, E. (2004). Background Neutron Spectrum at 2420 m above sea level. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 524 (1-3), 146 – 151.
- Velazco, R., Fouillat, P. y Reis, R. (2007). *Radiation Effects on Embedded System*. Editorial Springer Netherland – Holanda. 3 – 4.
- Villalobos, D. (2008). *Investigación Científica*. Editorial Libunsa.
- Weissman, P., McFadden, A. y Johnson, T. (2007). *Encyclopedia of the Solar System*. Editorial Academic Press, USA. 630 – 652.

Weller, R., Reed, R., Warren, K., Mendenhall, M., Sierawski, B., Schrimpf, R. and Massengill, L., (2009). General Framework for Single Event Effects Rate Prediction in Microelectronics. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 56 (6), 3098 – 3108.

Ziegler, J. (1996). Terrestrial Cosmic Rays And Soft Errors. *IBM Journal of Research and Development*. 40 (1), 19 – 39.



ANEXOS

Anexo 1. Exposición de resultados en ANDESCON 2016



Proceso de medición

**Anexo 2 .Valores medidos en la ciudad de Puno con el equipo FHT 762
WENDI-2**

PUNO					
imp/sec	553,61792	536,57984	543,8448	588,32208	605,636
589,13408	555,84096	532,39376	542,56864	589,09392	612,84912
589,2776	560,41296	528,38432	542,29152	589,09232	609,36848
591,0712	563,38368	524,4064	538,1672	589,46992	612,83184
590,27888	561,89152	525,15664	535,13408	594,364	613,93824
587,66128	565,3696	526,61728	534,8024	593,36928	613,1
587,2712	567,9848	534,48096	529,2968	599,15728	614,76352
585,83408	572,52128	535,21248	524,99232	590,90304	612,292
586,13136	572,58784	538,25104	523,3592	591,23312	612,43184
582,1464	574,20704	534,81072	524,08288	589,06768	617,94384
587,71984	575,15008	532,31296	520,61408	594,25504	616,8664
584,14992	573,17424	535,63056	519,94064	590,92048	607,78448
584,67312	568,37872	540,16784	519,71984	594,24336	
586,66992	569,5248	539,99056	520,67008	595,01968	
582,9952	570,7096	542,9144	520,17808	595,59744	
583,41296	572,21792	541,7032	520,41632	594,94672	
583,8376	567,63376	545,50144	519,25424	592,096	
584,19584	559,85392	544,0384	520,44976	590,0544	

581,34768	560,81216	543,93872	522,98656	582,01376
577,61792	560,33648	544,33872	525,52224	571,94928
575,43984	563,22336	545,14048	523,27248	572,10512
576,76528	566,04592	546,84624	531,79424	572,47632
579,44512	564,07392	544,3392	537,71216	574,03344
577,724	570,67312	542,692	544,40544	576,93984
578,11488	565,51776	544,23232	538,99088	579,88432
567,51104	564,25568	544,39888	541,75104	579,7056
566,06816	567,73712	544,66832	546,30736	584,54592
563,29792	566,3624	545,35152	550,96512	586,36048
564,2336	562,604	549,20688	555,70304	594,4224
564,7536	561,85776	549,1776	557,37968	596,01376
570,21232	561,4792	549,80752	557,10624	602,17568
570,57904	564,17792	549,09296	560,38384	593,10544
572,54096	564,90016	547,1728	559,0064	594,86976
575,67104	565,57056	546,95248	561,032	587,82704
567,584	560,888	547,06432	563,58768	591,06752
570,49008	557,2144	542,05184	565,30864	596,29456
566,02592	555,63056	546,22976	568,01296	600,70064
567,66576	554,27936	544,8736	570,72704	604,56144
569,34112	546,17936	547,41824	571,89648	603,03072

567,44192	540,10944	544,91472	575,11152	604,7776
566,00208	535,10752	548,96656	575,50128	606,38432
567,53984	535,34736	549,6384	577,0528	604,27664
566,3792	535,13472	545,4216	579,33072	613,28432
565,36928	538,01392	540,89264	576,26832	608,0704
558,4256	533,26576	540,30912	575,6456	609,05296
559,84272	534,75808	542,48096	579,94992	610,48448
560,84576	535,08544	543,4384	582,27296	605,70512

Anexo 3. Resultados obtenidos para las ciudades de Guadalajara y Oulo con el algoritmo de Montecarlo

Guadalajara en España ciudad situada a 685 msnm

Monte Carlo Algorithm – C Test - CALM – 100 trials

```

C:\Users\cromero\Documents\UNA\LenguajesProgramacion\myprog\monteca...
count= 63 , x= 0.255196 , y= 0.0640278 , z= 0.0692244
count= 64 , x= 0.792657 , y= 0.547136 , z= 0.927663
count= 65 , x= 0.745567 , y= 0.416547 , z= 0.729382
count= 66 , x= 0.149144 , y= 0.581256 , z= 0.360102
count= 67 , x= 0.294961 , y= 0.924192 , z= 0.941133
count= 67 , x= 0.82458 , y= 0.961974 , z= 1.60533
count= 67 , x= 0.926176 , y= 0.728294 , z= 1.38821
count= 68 , x= 0.266518 , y= 0.231574 , z= 0.124659
count= 69 , x= 0.856319 , y= 0.144566 , z= 0.754181
count= 70 , x= 0.125919 , y= 0.142827 , z= 0.0362551
count= 71 , x= 0.210547 , y= 0.14771 , z= 0.0661482
count= 72 , x= 0.928617 , y= 0.269295 , z= 0.93485
count= 73 , x= 0.315622 , y= 0.115482 , z= 0.112954
count= 73 , x= 0.967376 , y= 0.953764 , z= 1.84548
count= 73 , x= 0.979644 , y= 0.614216 , z= 1.33696
count= 74 , x= 0.0711386 , y= 0.625568 , z= 0.396397
count= 75 , x= 0.664693 , y= 0.506149 , z= 0.698004
count= 76 , x= 0.407636 , y= 0.018891 , z= 0.166524
count= 77 , x= 0.958129 , y= 0.160588 , z= 0.943799
count= 77 , x= 0.974731 , y= 0.32194 , z= 1.05375
# of trials= 100 , estimate of CALM imp/sec is 70.07

-----
Process exited after 2.331 seconds with return value 0
Press any key to continue . . .

```

Monte Carlo Algorithm – C Test - CALM – 1000 trials

```

C:\Users\cromero\Documents\UNA\LenguajesProgramacion\myprog\monteca...
count= 782 , x= 0.725181 , y= 0.129032 , z= 0.542537
count= 783 , x= 0.0985137 , y= 0.349498 , z= 0.131854
count= 784 , x= 0.510453 , y= 0.609546 , z= 0.632108
count= 785 , x= 0.0952788 , y= 0.202643 , z= 0.0501422
count= 785 , x= 0.945891 , y= 0.742485 , z= 1.44599
count= 786 , x= 0.107517 , y= 0.747246 , z= 0.569936
count= 787 , x= 0.12479 , y= 0.0976897 , z= 0.0251159
count= 788 , x= 0.375378 , y= 0.913724 , z= 0.9758
count= 789 , x= 0.803186 , y= 0.26545 , z= 0.715572
count= 790 , x= 0.054445 , y= 0.956481 , z= 0.917819
count= 791 , x= 0.554277 , y= 0.0166021 , z= 0.307499
count= 792 , x= 0.859951 , y= 0.146306 , z= 0.76092
count= 792 , x= 0.816279 , y= 0.785211 , z= 1.28287
count= 793 , x= 0.744133 , y= 0.363231 , z= 0.685671
count= 794 , x= 0.238441 , y= 0.254524 , z= 0.121637
count= 795 , x= 0.2631 , y= 0.621204 , z= 0.455116
count= 796 , x= 0.232826 , y= 0.327952 , z= 0.16176
count= 797 , x= 0.7893 , y= 0.0553301 , z= 0.626056
count= 798 , x= 0.136601 , y= 0.265725 , z= 0.0892694
count= 799 , x= 0.225929 , y= 0.403607 , z= 0.213943
# of trials= 1000 , estimate of CALM imp/sec is 72.709

-----
Process exited after 1.704 seconds with return value 0
Press any key to continue . . .

```

Monte Carlo Algorithm – C Test - CALM – 100000 trials

```

C:\Users\cromero\Documents\UNA\LenguajesProgramacion\myprog\monteca...
count= 78504 , x= 0.9000815 , y= 0.0299387 , z= 0.812364
count= 78505 , x= 0.0732749 , y= 0.509934 , z= 0.265402
count= 78506 , x= 0.423414 , y= 0.742698 , z= 0.73088
count= 78506 , x= 0.915677 , y= 0.574206 , z= 1.16818
count= 78507 , x= 0.856716 , y= 0.363292 , z= 0.865943
count= 78508 , x= 0.895962 , y= 0.296579 , z= 0.890708
count= 78509 , x= 0.131474 , y= 0.918241 , z= 0.860452
count= 78510 , x= 0.978118 , y= 0.15479 , z= 0.980675
count= 78511 , x= 0.205725 , y= 0.860164 , z= 0.782205
count= 78512 , x= 0.32429 , y= 0.602283 , z= 0.467908
count= 78513 , x= 0.399304 , y= 0.689016 , z= 0.634187
count= 78513 , x= 0.55623 , y= 0.909146 , z= 1.13594
count= 78513 , x= 0.996063 , y= 0.770592 , z= 1.58595
count= 78514 , x= 0.424726 , y= 0.778588 , z= 0.786592
count= 78515 , x= 0.519761 , y= 0.133457 , z= 0.287962
count= 78516 , x= 0.543657 , y= 0.769707 , z= 0.888012
count= 78517 , x= 0.590411 , y= 0.525834 , z= 0.625087
count= 78518 , x= 0.344768 , y= 0.0585345 , z= 0.122291
count= 78519 , x= 0.76632 , y= 0.51326 , z= 0.850682
count= 78519 , x= 0.90933 , y= 0.56798 , z= 1.14948
# of trials= 100000 , estimate of CALM imp/sec is 71.4523

-----
Process exited after 7.896 seconds with return value 0
Press any key to continue . . .
    
```

Oulo en Finlandia ciudad situada a 15 msnm

Monte Carlo Algorithm – C Test – OULU – 100 trials

```

C:\Users\cromero\Documents\UNA\LenguajesProgramacion\myprog\monteca...
count= 63 , x= 0.255196 , y= 0.0640278 , z= 0.0692244
count= 64 , x= 0.792657 , y= 0.547136 , z= 0.927663
count= 65 , x= 0.745567 , y= 0.416547 , z= 0.729382
count= 66 , x= 0.149144 , y= 0.581256 , z= 0.360102
count= 67 , x= 0.294961 , y= 0.924192 , z= 0.941133
count= 67 , x= 0.82458 , y= 0.961974 , z= 1.60533
count= 67 , x= 0.926176 , y= 0.728294 , z= 1.38821
count= 68 , x= 0.266518 , y= 0.231574 , z= 0.124659
count= 69 , x= 0.856319 , y= 0.144566 , z= 0.754181
count= 70 , x= 0.125919 , y= 0.142827 , z= 0.0362551
count= 71 , x= 0.210547 , y= 0.14771 , z= 0.0661482
count= 72 , x= 0.928617 , y= 0.269295 , z= 0.93485
count= 73 , x= 0.315622 , y= 0.115482 , z= 0.112954
count= 73 , x= 0.967376 , y= 0.953764 , z= 1.84548
count= 73 , x= 0.979644 , y= 0.614216 , z= 1.33696
count= 74 , x= 0.0711386 , y= 0.625568 , z= 0.396397
count= 75 , x= 0.664693 , y= 0.506149 , z= 0.698004
count= 76 , x= 0.407636 , y= 0.018891 , z= 0.166524
count= 77 , x= 0.958129 , y= 0.160588 , z= 0.943799
count= 77 , x= 0.974731 , y= 0.32194 , z= 1.05375
# of trials= 100 , estimate of OULU imp/sec is 105.49

-----
Process exited after 2.168 seconds with return value 0
Press any key to continue . . .
    
```


Monte Carlo Algorithm – C Test – OULU – 1000 trials

```

C:\Users\cromero\Documents\UNA\LenguajesProgramacion\myprog\monteca...
count= 782 , x= 0.725181 , y= 0.129032 , z= 0.542537
count= 783 , x= 0.0985137 , y= 0.349498 , z= 0.131854
count= 784 , x= 0.510453 , y= 0.609546 , z= 0.632108
count= 785 , x= 0.0952788 , y= 0.202643 , z= 0.0501422
count= 785 , x= 0.945891 , y= 0.742485 , z= 1.44599
count= 786 , x= 0.107517 , y= 0.747246 , z= 0.569936
count= 787 , x= 0.12479 , y= 0.0976897 , z= 0.0251159
count= 788 , x= 0.375378 , y= 0.913724 , z= 0.9758
count= 789 , x= 0.803186 , y= 0.26545 , z= 0.715572
count= 790 , x= 0.054445 , y= 0.956481 , z= 0.917819
count= 791 , x= 0.554277 , y= 0.0166021 , z= 0.307499
count= 792 , x= 0.859951 , y= 0.146306 , z= 0.76092
count= 792 , x= 0.816279 , y= 0.785211 , z= 1.28287
count= 793 , x= 0.744133 , y= 0.363231 , z= 0.685671
count= 794 , x= 0.238441 , y= 0.254524 , z= 0.121637
count= 795 , x= 0.2631 , y= 0.621204 , z= 0.455116
count= 796 , x= 0.232826 , y= 0.327952 , z= 0.16176
count= 797 , x= 0.7893 , y= 0.0553301 , z= 0.626056
count= 798 , x= 0.136601 , y= 0.265725 , z= 0.0892694
count= 799 , x= 0.225929 , y= 0.403607 , z= 0.213943
# of trials= 1000 , estimate of OULU imp/sec is 109.463

-----
Process exited after 2.373 seconds with return value 0
Press any key to continue . . .

```

Monte Carlo Algorithm – C Test – OULU – 100000 trials

```

C:\Users\cromero\Documents\UNA\LenguajesProgramacion\myprog\monteca...
count= 78504 , x= 0.900815 , y= 0.0299387 , z= 0.812364
count= 78505 , x= 0.0732749 , y= 0.509934 , z= 0.265402
count= 78506 , x= 0.423414 , y= 0.742698 , z= 0.73088
count= 78506 , x= 0.915677 , y= 0.574206 , z= 1.16818
count= 78507 , x= 0.856716 , y= 0.363292 , z= 0.865943
count= 78508 , x= 0.895962 , y= 0.296579 , z= 0.890708
count= 78509 , x= 0.131474 , y= 0.918241 , z= 0.860452
count= 78510 , x= 0.978118 , y= 0.15479 , z= 0.980675
count= 78511 , x= 0.205725 , y= 0.860164 , z= 0.782205
count= 78512 , x= 0.32429 , y= 0.602283 , z= 0.467908
count= 78513 , x= 0.399304 , y= 0.689016 , z= 0.634187
count= 78513 , x= 0.55623 , y= 0.909146 , z= 1.13594
count= 78513 , x= 0.996063 , y= 0.770592 , z= 1.58595
count= 78514 , x= 0.424726 , y= 0.778588 , z= 0.786592
count= 78515 , x= 0.519761 , y= 0.133457 , z= 0.287962
count= 78516 , x= 0.543657 , y= 0.769707 , z= 0.888012
count= 78517 , x= 0.590411 , y= 0.525834 , z= 0.625087
count= 78518 , x= 0.344768 , y= 0.0585345 , z= 0.122291
count= 78519 , x= 0.76632 , y= 0.51326 , z= 0.850682
count= 78519 , x= 0.90933 , y= 0.56798 , z= 1.14948
# of trials= 100000 , estimate of OULU imp/sec is 107.571

-----
Process exited after 8.371 seconds with return value 0
Press any key to continue . . .

```

Anexo 4. Resultados obtenidos para la ciudad de Puno con el algoritmo de Montecarlo

Monte Carlo Algorithm – C Test – PUNO – 100 trials

```

C:\Users\cromero\Documents\UNA\LenguajesProgramacion\myprog\monteca...
count= 63 , x= 0.255196 , y= 0.0640278 , z= 0.0692244
count= 64 , x= 0.792657 , y= 0.547136 , z= 0.927663
count= 65 , x= 0.745567 , y= 0.416547 , z= 0.729382
count= 66 , x= 0.149144 , y= 0.581256 , z= 0.360102
count= 67 , x= 0.294961 , y= 0.924192 , z= 0.941133
count= 67 , x= 0.82458 , y= 0.961974 , z= 1.60533
count= 67 , x= 0.926176 , y= 0.728294 , z= 1.38821
count= 68 , x= 0.266518 , y= 0.231574 , z= 0.124659
count= 69 , x= 0.856319 , y= 0.144566 , z= 0.754181
count= 70 , x= 0.125919 , y= 0.142827 , z= 0.0362551
count= 71 , x= 0.210547 , y= 0.14771 , z= 0.0661482
count= 72 , x= 0.928617 , y= 0.269295 , z= 0.93485
count= 73 , x= 0.315622 , y= 0.115482 , z= 0.112954
count= 73 , x= 0.967376 , y= 0.953764 , z= 1.84548
count= 73 , x= 0.979644 , y= 0.614216 , z= 1.33696
count= 74 , x= 0.0711386 , y= 0.625568 , z= 0.396397
count= 75 , x= 0.664693 , y= 0.506149 , z= 0.698004
count= 76 , x= 0.407636 , y= 0.018891 , z= 0.166524
count= 77 , x= 0.958129 , y= 0.160588 , z= 0.943799
count= 77 , x= 0.974731 , y= 0.32194 , z= 1.05375
# of trials= 100 , estimate of PUNO imp/sec is 554.4

-----
Process exited after 1.715 seconds with return value 0
Press any key to continue . . .
    
```

Monte Carlo Algorithm – C Test – PUNO – 1000 trials

```

C:\Users\cromero\Documents\UNA\LenguajesProgramacion\myprog\monteca...
count= 782 , x= 0.725181 , y= 0.129032 , z= 0.542537
count= 783 , x= 0.0985137 , y= 0.349498 , z= 0.131854
count= 784 , x= 0.510453 , y= 0.609546 , z= 0.632108
count= 785 , x= 0.0952788 , y= 0.202643 , z= 0.0501422
count= 785 , x= 0.945891 , y= 0.742485 , z= 1.44599
count= 786 , x= 0.107517 , y= 0.747246 , z= 0.569936
count= 787 , x= 0.12479 , y= 0.0976897 , z= 0.0251159
count= 788 , x= 0.375378 , y= 0.913724 , z= 0.9758
count= 789 , x= 0.803186 , y= 0.26545 , z= 0.715572
count= 790 , x= 0.054445 , y= 0.956481 , z= 0.917819
count= 791 , x= 0.554277 , y= 0.0166021 , z= 0.307499
count= 792 , x= 0.859951 , y= 0.146306 , z= 0.76092
count= 792 , x= 0.816279 , y= 0.785211 , z= 1.28287
count= 793 , x= 0.744133 , y= 0.363231 , z= 0.685671
count= 794 , x= 0.238441 , y= 0.254524 , z= 0.121637
count= 795 , x= 0.2631 , y= 0.621204 , z= 0.455116
count= 796 , x= 0.232826 , y= 0.327952 , z= 0.16176
count= 797 , x= 0.7893 , y= 0.0553301 , z= 0.626056
count= 798 , x= 0.136601 , y= 0.265725 , z= 0.0892694
count= 799 , x= 0.225929 , y= 0.403607 , z= 0.213943
# of trials= 1000 , estimate of PUNO imp/sec is 575.28

-----
Process exited after 2.862 seconds with return value 0
Press any key to continue . . .
    
```

Monte Carlo Algorithm – C Test – PUNO – 100000 trials

```
C:\Users\cromero\Documents\UNA\LenguajesProgramacion\myprog\monteca...
count= 78504 , x= 0.900815 , y= 0.0299387 , z= 0.812364
count= 78505 , x= 0.0732749 , y= 0.509934 , z= 0.265402
count= 78506 , x= 0.423414 , y= 0.742698 , z= 0.73088
count= 78506 , x= 0.915677 , y= 0.574206 , z= 1.16818
count= 78507 , x= 0.856716 , y= 0.363292 , z= 0.865943
count= 78508 , x= 0.895962 , y= 0.296579 , z= 0.890708
count= 78509 , x= 0.131474 , y= 0.918241 , z= 0.860452
count= 78510 , x= 0.978118 , y= 0.15479 , z= 0.980675
count= 78511 , x= 0.205725 , y= 0.860164 , z= 0.782205
count= 78512 , x= 0.32429 , y= 0.602283 , z= 0.467908
count= 78513 , x= 0.399304 , y= 0.689016 , z= 0.634187
count= 78513 , x= 0.55623 , y= 0.909146 , z= 1.13594
count= 78513 , x= 0.996063 , y= 0.770592 , z= 1.58595
count= 78514 , x= 0.424726 , y= 0.778588 , z= 0.786592
count= 78515 , x= 0.519761 , y= 0.133457 , z= 0.287962
count= 78516 , x= 0.543657 , y= 0.769707 , z= 0.888012
count= 78517 , x= 0.590411 , y= 0.525834 , z= 0.625087
count= 78518 , x= 0.344768 , y= 0.0585345 , z= 0.122291
count= 78519 , x= 0.76632 , y= 0.51326 , z= 0.850682
count= 78519 , x= 0.90933 , y= 0.56798 , z= 1.14948
# of trials= 100000 , estimate of PUNO imp/sec is 565.337

-----
Process exited after 7.547 seconds with return value 0
Press any key to continue . . .
```