

## Simulación Monte Carlo de producción de squarks en colisiones protón-protón a $\sqrt{s} = 7$ TeV

### Monte Carlo Simulation squarks production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV

Roger Rodrigo Galindo,<sup>1</sup> José Herman Muñoz-Ñungo<sup>1\*</sup> y Bernardo Gómez.<sup>2</sup>

**Resumen.** Se presenta un estudio para determinar la posibilidad de encontrar señales su- persimétricas en colisiones p-p a una energía de centro de masa de 7 TeV, como podría lograrse en experimentos con el acelerador colisionador LHC. Se hizo un análisis de señales de *squarks* con muones de signo opuesto en el estado final, jets y energía transversal faltante a partir del modelo *mSUGRA*. Se compararon los resultados con eventos simulados de *QCD* y  $t\bar{t}$  donde estén presentes los mismos estados finales, aplicando cortes y filtros para reducir la señal de background del *Modelo Estándar* y así determinar el cociente entre la señal y el ruido para la detección de squarks. Para esto, se empleó el rango de masa LM2 del modelo *mSUGRA*, utilizando los paquetes de Pythia y Geant4 que permiten recrear la física de interés del producto de colisiones p-p y la simulación de un detector típico para experimentos a las energías del colisionador del LHC.

**Palabras clave:** LHC, Supersimetría, mSUGRA.

**Abstract.** We present a study in order to determine the possibility of finding supersym- metric signals in p-p collisions at 7 TeV in the center of mass as could be to get in LHC experiments. We perform an analysis, in the *mSUGRA* model, of squarks with muons of different sign in the final state, jets and missing transverse energy. We compare with simulated events of *QCD* and  $t\bar{t}$  with the same final states, using cuts and filters in order to reduce the background of the *Standard Model* and determine the fraction between the noise and the signal for the detection of squarks. We employ the mass region LM2 and use the Pythia and Geant4 packages, which allow to simulate the p-p collisions and a typical detector in the LHC experiments.

**Keywords:** LHC, Supersymmetry, mSUGRA.

<sup>1</sup> Grupo de Física de Partículas-Quark, Universidad del Tolima, C.P. 73000-6299, Ibagué, Tolima. Colombia.

<sup>2</sup> Grupo de Física de alta energía, Universidad del Tolima, C.P. 73000-6299, Ibagué, Tolima. Colombia.

\* jhmunoz@ut.edu.co

## 1. Introducción

De acuerdo con los resultados recientes de los experimentos ATLAS y CMS del LHC [1], hay evidencia de la existencia del bosón de Higgs en un rango de masa invariante de 125-126 GeV con una significancia de aproximadamente  $5\sigma$ . Este descubrimiento motiva a explorar física más allá del Modelo Estándar (ME), siendo la supersimetría (SUSY) la mejor candidata a la teoría que describa la física de partículas [2], ya que, en el modelo mínimo supersimétrico (MSSM), el sector del Higgs consiste en dos dobletes de los campos, lo que permite obtener Higgses cargados, y de acuerdo con la razón de sus valores esperados en el vacío, construyen los fundamentos de MSSM. Es importante resaltar que hay bastante interés experimental en la búsqueda de señales supersimétricas como fué, en el colisionador Tevatron y actualmente en el LHC (ver por ejemplo la ref. [3]).

En este artículo, presentamos un estudio de simulación Monte Carlo de acuerdo con el modelo de supergravedad mínima (mSUGRA) [4] para detectar partículas SUSY en un experimento típico del LHC bajo los parámetros fijos de masas bajas LM2<sup>1</sup>. Este modelo asume que la ruptura de simetría ocurre cuando existe completamente un acoplamiento a la gravedad en su forma más simple. En la tabla 1, presentamos los valores de los cinco parámetros libres en el rango de masa LM2.

Tabla 1. Valores de los parámetros de mSUGRA en el rango de masa LM2 [6]

$m_0$ (GeV)	$m_{1/2}$ (GeV)	$\tan\beta$	$\text{sign}(\mu)$	$A_0$
185	350	35	+	0

Simulamos colisiones  $p$ - $p^2$  para señales de SUSY LM2 y el background de ME con señales de QCD y  $t\bar{t}$  de acuerdo con el número de eventos, sección eficaz ( $\sigma$ ) y luminosidad presentados en la tabla 2 [8]. Hemos buscado señales donde estén presentes los mismos estados finales leptónicos con pares de muones, estados finales hadrónicos con varios jets y energía transversal faltante debida a la presencia de neutrinos y/o neutralinos. En este estudio, se empleó el *software* Pythia 8 para generar eventos [9] y Geant4 para simular un detector típico [10] para experimentos que colisionan protones a una energía de centro de masa  $\sqrt{s} = 7$  TeV.

## 2. Análisis de jets

En esta sección, presentamos el análisis realizado a los jets [11] presentes en cada señal simulada. En la tabla 3, se muestran los cortes cinemáticos aplicados para el momento transversal ( $p_T$ ), la pseudorapidez ( $\eta$ ) y la fracción electromagnética de los jets.

<sup>1</sup>En la referencia [5] se hizo una búsqueda de señales de SUSY en el rango de masa LM0 y LM1.

<sup>2</sup>Los códigos para introducir las partículas incidentes se tomaron de [7].

Tabla 2. Señales simuladas y background

Señal	Número de eventos	$\sigma(\text{pb})$	Luminosidad ( $\text{pb}^{-1}$ )
SUSY LM2	150000	0.8565	175131.34851
QCD	500000	25470	19.63094
$t\bar{t}$	200000	94.3	2120.89077

Tabla 3. Cortes cinemáticos para la selección de jets

Variable	Corte
$p_T$	$\geq 30 \text{ GeV}$
$ \eta $	$\leq 2,4$
Fracción electromagnética	$\geq 0,1$

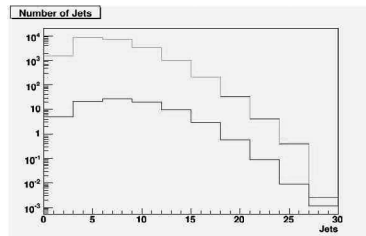


Figura 1: Número de jets

Como existen diversos análisis para la búsqueda de señales SUSY donde pueden estar presentes jets, dijets o multijets, es importante determinar el número de jets en cada evento. En la figura 1, mostramos el número de jets presentes en cada señal (la línea azul representa la señal de SUSY, la verde la de QCD y la roja la señal  $t\bar{t}$ ). Aquí se observa que esta variable no permite distinguir una señal clara de SUSY con respecto al background de ME, aunque permite identificar que en eventos en los que hay más de 27 jets, la señal de background y la de SUSY tienen el mismo orden de magnitud, sin embargo, son muy pocos los eventos comparados con la producción de QCD.

Adicional al número de jets, simulamos la energía depositada por los jets en el calorímetros electromagnético que llamaremos ECAL, y en el calorímetro hadrónico, que denominaremos HCAL. En la figura 2, se muestran los histogramas para la energía en el ECAL y en el HCAL (las líneas azul, verde y roja representan las señales de SUSY, QCD y  $t\bar{t}$  respectivamente). Se observa en la figura 2(a) que, debido a la gran producción de jets en eventos de ME, las señales de SUSY no son perceptibles significativamente en el detector, por lo que esta variable no permite distinguir eventos SUSY de aquellos que no lo son. Ahora, debido a la cascada hadrónica en la figura 2(b) los jets depositan casi toda su energía en el HCAL, y permiten una señal más limpia en la cámara muónica

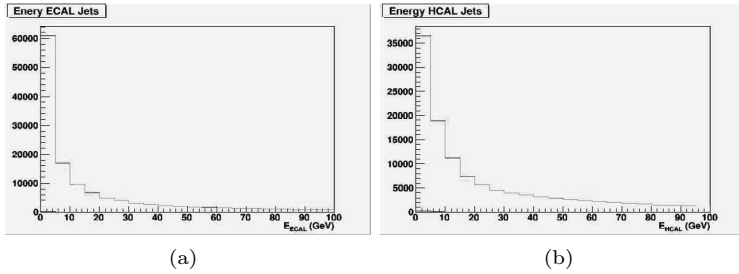


Figura 2: Energía depositada por los jets en el calorímetro electromagnético ECAL (a) y en el calorímetro hadrónico HCAL (b)

que arrojan resultados similares a los eventos registrados en el ECAL.

Es importante reconocer la energía total que lleva el jet, por lo que la suma de la energía depositada en los ECAL y HCAL da la información de este valor, como se observa en la figura 3(a) (con colores azul, verde y roja están representadas las señales de SUSY, QCD y  $t\bar{t}$  respectivamente). Puesto que en ninguno de los calorímetros se pueden discriminar señales supersimétricas en el rango LM2, la energía total por sí sola no es una variable óptima para la búsqueda de este tipo de nueva física. Esta variable indica la cantidad de energía del jet que proviene de la interacción con el ECAL, y así, si es de un valor pequeño se puede garantizar que es proveniente de una cascada hadrónica, y, debido a la eficiencia del detector se requiere una fracción mayor de 0,1 de la energía total del jet, como se observa en la figura 3(b). Esta variable permite determinar que la señal de background de ME está por encima de la señal SUSY en dos ordenes de magnitud, con respecto a la fracción electromagnética de los jets.

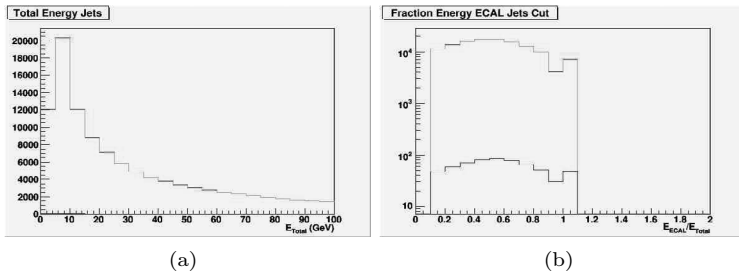


Figura 3: (a) Energía total depositada por los jets en los ECAL y HCAL; (b) fracción de energía electromagnética con respecto a la energía total

Por otra parte, hemos simulado el momento transversal de los jets (ver figura 4). La figura 4(a) muestra que podemos despreciar jets de bajo  $p_T$  ( $p_T \leq 30$  GeV). En la figura 4(b), donde con color azul se registra la señal de SUSY, con verde la señal de QCD y con rojo la de  $t\bar{t}$ , se muestra que para jets de alto mo-

mento, cercano a los 100 GeV, no es posible evidenciar señales supersimétricas, ya que el background excede en más de dos órdenes de magnitud, lo que las haría muy difíciles de detectar sin una gran estadística.

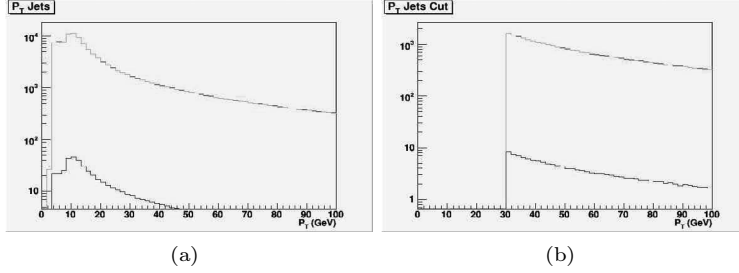


Figura 4: Momento transversal antes (a) y después (b) de aplicar el corte cinemático

Por último, hemos simulado la pseudorapidez del jet, ya que si estos van muy cerca de la dirección de los rayos de protones incidentes, no se puede medir su energía, por lo que si, ésta es muy grande se rechazan. En la figura 5, se observa, que antes de los cortes, la señal de SUSY no sería perceptible, pero, debido a la eficiencia del detector, supersimetría en el rango LM2, podría estar presente con la suficiente estadística, aunque sigue siendo excedida en dos órdenes de magnitud por la señal de background de ME.

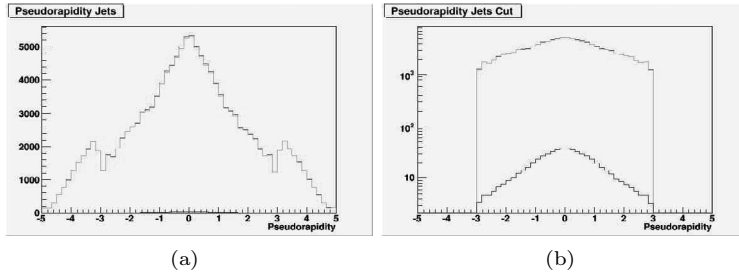


Figura 5: Pseudorapidez de los jets antes (a) y después (b) de aplicar el corte cinemático

### 3. Análisis de muones

Para el presente análisis, se empleó un algoritmo de reconstrucción global, que permite considerar la señal de partículas como muón desde el punto de colisión, pasando por el detector de trazas que llamamos *tracker*, luego a los calorímetros hasta alcanzar las cámaras de muones; exigiéndose que el muón provenga del vértice central y no de decaimientos posteriores, por ejemplo de

piones o kaones. Se han escogido cortes cinemáticos para el momento transversal ( $p_T$ ), pseudorapidez ( $\eta$ ), parámetro de aislamiento, parámetro de impacto ( $d_0$ ), número de impactos del muón y el ajuste de los impactos de  $\chi^2$  reducido ( $\chi^2/dof$ ). Los valores de estos cortes se presentan en la tabla 4.

Tabla 4: Cortes cinemáticos para la selección de muones globales

Variable	Corte
$p_T$	$\geq 20 GeV$
$ \eta $	$\leq 2,4$
Parámetro de Aislamiento	$< 0,1$
$ d_0 $	$< 0,2 cm$
$\chi^2/dof$	$< 10$
Número de Hits Válidos	$\geq 10$

Para este análisis, se requiere que estén presentes dos muones en el estado final. Generamos el histograma del número de muones que impactan las cámaras de muones por evento para seleccionar eventos de dos muones (dimuones). Como se puede observar en la figura 6 para eventos en los que están presentes dos muones, se muestra que la señal de SUSY (azul) es opacada por las señales de QCD (verde) y  $t\bar{t}$  (rojo) en más del doble de eventos, aunque están presentes en el mismo orden de magnitud. Esto implica que esta variable por sí sola no es suficiente para la búsqueda de señales SUSY, ya que siempre la señal de background está por encima de esta.

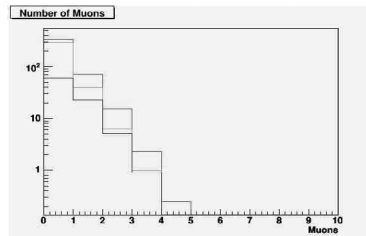


Figura 6: Número de muones

También estudiamos la calidad de la traza reconstruida que depende del número de hits registrados para el muón, en especial en el tracker central. Con muy pocos hits registrados, la traza será menos confiable, que con bastantes hits registrados. Estos impactos pueden ser tomados como semillas, y para esto se requiere que haya como mínimo 10 hits registrados en el tracker central en la figura 7(a). Esta variable muestra que un gran porcentaje de la señal de SUSY (azul) puede ser reconstruida en el tracker central, a diferencia de la señal de background (verde para QCD y roja para  $t\bar{t}$ ), que tiene una gran cantidad de eventos con pocos hits válidos que no permiten tener certeza de la traza de muones producidos en eventos de ME.

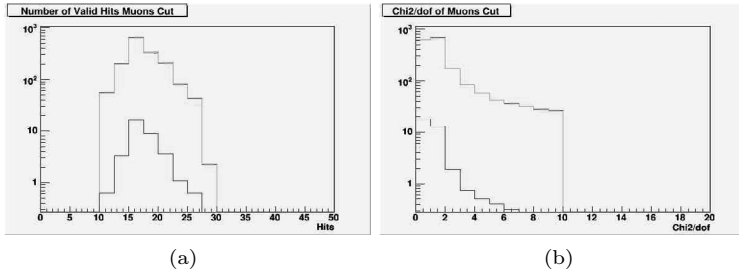


Figura 7: Número de impactos válidos en el tracker central (a) y el ajuste de  $\chi^2$  (b)

Ahora nos han interesado muones que tienen una buena traza reconstruida a partir de los hits registrados a lo largo de toda la trayectoria del muon, desde el tracker central, pasando por los ECAL y HCAL, y finalmente en la secuencia de cámaras de muones, teniendo en cuenta las desviaciones en los campos magnéticos en el interior y en el exterior del solenoide. El software de reconstrucción hace un ajuste (fit) de una curva (traza) a la serie de datos (los hits registrados en la secuencia de detectores). La calidad del fit se mide con un test de  $\chi^2$ , y se divide por el número de grados de libertad del muón. Esto permite garantizar que se tiene un muón, donde la incertidumbre en la reconstrucción de su trayectoria no es muy alta, es decir, para valores menores de 10, como se observa en la figura 7(b).

Parte de la calidad del muón reconstruido está en su energía medida. Tanto en el tracker central, y en especial en los calorímetros, esta medición se dificulta si el muón está cerca a un jet o en medio de un jet. Es más confiable la energía que se obtiene para el muón si este está aislado, no tan cerca de los jets en los calorímetros. Esto evita que otros eventos depositen energía en los calorímetros y puedan parecer una señal de un muón, lo que se consigue con un aislamiento relativo menor de 0,1, por lo tanto, generamos el histograma del parámetro de aislamiento que se observa en la figura 8(b).

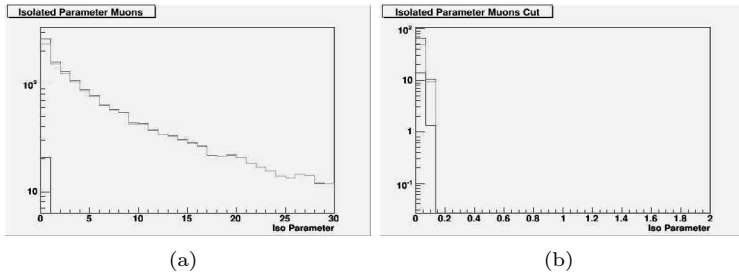


Figura 8: Parámetro de aislamiento de los muones antes (a) y después (b) de aplicar el corte

El parámetro de aislamiento de los muones puede ser calculado a partir de la relación [10]

$$Iso = \left( \sum_{\Delta R < 0,3} E_{ECAL} + \sum_{\Delta R < 0,3} E_{HCAL} + \sum_{\Delta R < 0,3} p_{Ttracker} \right) / p_{t\mu}, \quad (1)$$

la cual indica que se forma un cono alrededor del muón con un radio de 0,3 cm que garantiza así que este se encuentre aislado.

Debido a que interesan muones que provengan del vértice de colisión, estudiamos la distancia entre la traza inicial del muón y el punto de colisión central, es decir, el parámetro de impacto que se interpreta como la distancia que hay entre el muón y el vértice primario, y permite descartar muones que provienen de decaimientos posteriores. Quedando únicamente muones globales, se pueden considerar aquellos con un parámetro de impacto menor de 10 cm. Esta variable permite identificar la cantidad de eventos con muones provenientes del vértice central de colisión, pero no permite discriminar señales SUSY (azul) de ME (verde y rojo), ya que, según la figura 9, estos eventos están presentes en dos órdenes de magnitud. Además, todos los eventos de SUSY LM2 son producto del vértice de colisión, a diferencia de la señales de background que muestran un gran número de decaimientos procedentes con muones.

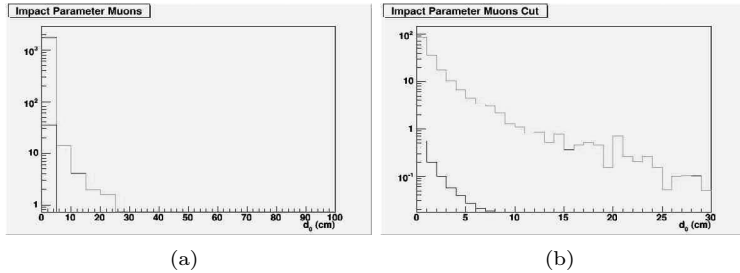


Figura 9: Parámetro de impacto de los muones antes (a) y después (b) de aplicar el corte

Posteriormente, estudiamos el momento transversal de los muones, debido a que se requieren muones que tengan una energía mínima y un momento transversal no muy pequeño para eliminar el ruido, como se exige para los muones provenientes de eventos SUSY. Entonces, para un momento transversal mayor de 20 GeV, se puede garantizar que los muones impactarán, además del tracker central, las cámaras de muones. Para el caso cuando no se han aplicado cortes, se observa en la figura 10(a) que, para muones de bajo momento, la señal de background (colores verde y rojo) es muy grande, comparada con la señal de SUSY en más de un orden de magnitud de eventos; para el caso de los muones de alto momento hasta los 100 GeV, aún no es clara la señal de SUSY (color azul), lo que indica, que para la búsqueda de supersimetría en el rango LM2,



esta variable permite discriminar eventos SUSY de acuerdo con los parámetros de mSUGRA.

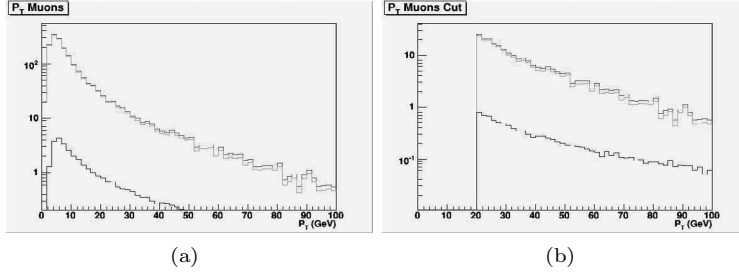


Figura 10: Momento transversal de los muones antes (a) y después (b) de aplicar cortes

## 4. Energía transversal faltante

Una de las señales experimentales más importantes que permitiría revelar la existencia de física más allá del ME, sería aquella en la que partículas predichas por un modelo supersimétrico interactúen débilmente con la materia; para el caso del modelo mSUGRA, y debido a la R-paridad, se espera que una partícula supersimétrica decaiga en otra partícula más ligera y estable (neutralino); algo similar ocurre en el ME con el neutrino, pero con una masa mucho menor. Entonces al aplicar conservación del momento en el plano transversal medido por los calorímetros, cualquier desequilibrio significativo en el momento transversal indica la producción de una partícula que interactúa débilmente lo que lo hace un proceso de interés. La energía transversal faltante se determina mediante la suma vectorial de la energía depositada en cada celda del calorímetro [10]

$$\vec{E}_T^{miss} = - \sum_n \left( E_n \sin \theta_n \cos \phi_n \hat{i} + E_n \sin \theta_n \sin \phi_n \hat{j} \right). \quad (2)$$

La energía transversal faltante es sensible a problemas del funcionamiento del detector o a partículas que interactúen en lugares intermedios entre las diferentes celdas, lo que resultaría también en un desequilibrio en la energía transversal que se podría confundir con una señal SUSY, pero, permite separar eventos de ME y distinguir SUSY si realmente existe en la naturaleza.

Por lo tanto, generamos el histograma para la energía transversal faltante (ver figura 11) que es parte de la huella de eventos de supersimetría. Tal vez esta variable es la que mejor permite evidenciar la existencia de una naturaleza supersimétrica, ya que, cerca de los 400 GeV, la señal de SUSY LM2 (azul) tiene una producción de eventos similar al background (QCD en verde y  $t\bar{t}$  en rojo), lo que permitiría concluir que, para el modelo mSUGRA con los parámetros de

LM2, se podrían observar claramente las partículas supersimétricas no interactuantes con la materia para masas superiores a los 400 GeV. Esto implica tener certeza en el cálculo de la energía transversal faltante, ya que es muy sensible a este tipo de eventos y cualquier error de cálculo podría interpretarse como evidencia de nueva física.

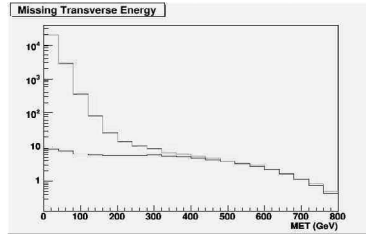


Figura 11: Energía transversal faltante

Para el cálculo del coeficiente entre la señal de SUSY al background, se puede emplear la energía transversal faltante que es la que mejor muestra evidencia de señales supersimétricas sin necesidad de aplicar cortes cinemáticos, escogiéndose para valores mayores de 400 GeV, aunque, con la baja estadística simulada, se requieren tiempos de medición muy prolongados al igual que simulaciones muy extensas en estadística.

## 5. Conclusiones

En este trabajo, hemos hecho una simulación con el software Pythia y Geant4 para buscar partículas supersimétricas en un experimento de colisiones protón-protón a  $\sqrt{s} = 7$  TeV bajo el modelo supersimétrico mSUGRA, en el rango de masa LM2 con estados finales de jets, muones y energía transversal faltante, considerando el background de QCD y  $t\bar{t}$ .

La gran cantidad de energía transversal faltante (MET) más allá de los 100 GeV no es explicada por procesos de ME. De acuerdo con estos resultados, se podría presentar eventos por encima del background sin necesidad de aplicar cortes, lo que permitiría concluir que un cálculo de MET hecho por el trigger de nivel 1 (L1) sería necesario para observar eventos de nueva física y desechar eventos de baja energía de ME.

El número de muones y el número de jets, de manera independiente, no permiten observar señales SUSY, ya que las señales de background siempre están por encima de la señal SUSY; sin embargo, combinados con dimuones, multijets, MET y la pseudorapidez podrían dar cuenta de canales SUSY de acuerdo con los parámetros que se escojan del modelo mSUGRA en la simulación.

La existencia de un bosón escalar de Higgs con una masa de 125 GeV [1] genera restricciones y limitaciones a las extensiones SUSY del ME [12]. Este valor implica que algunos de los valores de los parámetros de mSUGRA están

por encima del rango de masa LM2 (ver, por ejemplo, la ref. [12]). Este hecho permite concluir que el rango de masa LM2 no es un buen escenario para la búsqueda de señales supersimétricas.

## 6. Agradecimientos

A Colciencias y a la Oficina de Investigaciones de la Universidad del Tolima por la financiación de este proyecto. Adicionalmente, agradecemos al Ph. D. Andrés Osorio y al grupo de Altas Energías de la Universidad de los Andes por las constantes asesorías durante la evolución de este trabajo.

## Referencias

- [1] J. Incandela (en representación de la colaboración CMS), *Status of the CMS SM Higgs Search*, Julio 4 de 2012 [slides]; F. Gianotti (en representación de la colaboración ATLAS), *Status of Standard Model Higgs Search in ATLAS* en *Latest update in search for the Higgs boson at CERN*, Julio 4 de 2012 [slides].
- [2] S. P. Martin, *Supersymmetry Primer*, hep-ph/arXiv 9709356v3; I. Aitchison, *Supersymmetry and the MSSM: An Elementary Introduction*, hep-ph/arXiv 0505105v1; Y. Shirman, *TASI 2008: Introduction to supersymmetry and supersymmetry breaking*, hep-ph/arXiv 0907.0039v1.
- [3] S. Chatrchyan *et. al.* (CMS Collaboration), arXiv:1204.3774v1 [hep-ex]; S. Lowette (on behalf of the ATLAS and CMS collaborations), arXiv:1205.4053v1 [hep-ex]; X. Portell Bueso (on behalf of the ATLAS, CDF, CMS and D0 collaborations), arXiv:1112.1723v1 [hep-ex]; B. Butler (on behalf of the ATLAS collaboration), arXiv:1112.1722v1 [hep-ex], G. Aad *et. al.* (ATLAS Collaboration), arXiv:1204.3852v2.
- [4] I. Nierssen, *Supersymmetry Phenomenology in the mSUGRA Parameter Space*, Radbound University, 2008.
- [5] A. Ocampo, *Search for Squarks and Gluinos in events with muons, Jets and Missing Transverse Energy in pp collisions using the CMS detector*, Universidad de los Andes, Propuesta de tesis doctoral, 2008.
- [6] A. Cabrera, *Búsqueda de squarks con estados finales de dimuones de signo opuesto, jets y energía transversa faltante a  $\sqrt{s} = 7$  TeV en el experimento CMS*, Universidad de los Andes, Tesis de maestría, 2010.
- [7] K. Nakamura *et. al.* (Particle Data Group), J. Phys. G **37**, 075021 (2010).
- [8] M. Perelstein, *Introduction to Collider Physics*, hep-ph/arXiv 1002.0274v2.
- [9] T. Sjöstrand, S. Mrenna, P. Skands, *A Brief Introduction to PYTHIA 8.1*, hep-ex/arXiv 0710.3820; <http://geant4.cern.ch/>.

- [10] CMS Collaboration, *CMS PHYSICS: Technical Design Report Vol I: Detector Performance and Software*, CERN, 2006.
- [11] S.V. Chekanov, *Jet Algorithms: a minireview* hep-ph/arXiv 0211298v1.
- [12] F. Mahmuodi, arXiv:1205.3100v1 [hep-ex]; G. Altarelli, arXiv: 1206.1476v1 [hep-ex]; H. Baer, V. Barger, A. Mustafayev, arXiv:1112.3017v3 [hep-ph].

Referencia	Fecha de recepción	Fecha de aprobación
Galindo, R. R., Muñoz, J. H. y Gómez, B. Simulación Monte Carlo de producción de squarks en colisiones protón-protón a $p_s = 7$ TeV Revista Tumbaga (2012), 7, vol. II	Día/mes/año 31/07/2012	Día/mes/año 3/09/2012