



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“CONTRIBUCIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE
ESTRELLAS A LAS ABUNDANCIAS QUÍMICAS DEL
MEDIO INTERESTELAR”**

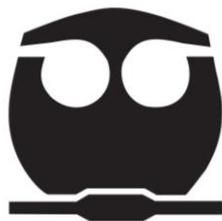
TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

QUÍMICA

PRESENTA:

ERIKA ELIZABETH HERNÁNDEZ LOZANO



MÉXICO D.F.

2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE	Juan Manuel Navarrete Tejero
VOCAL	José Manuel Méndez Stivalet
SECRETARIO	María Leticia Carigi Delgado
1er. SUPLENTE	Pandiyan Thangarasu
2° SUPLENTE	Ana Laura Maldonado Hermenegildo

ESTA TESIS FUE DESARROLLADA EN:

**Departamento de Estrellas y Medio Interestelar
Instituto de Astronomía UNAM, Ciudad Universitaria**

ÍNDICE

1.-INTRODUCCIÓN	3
1.1 Escalas de tiempo.....	3
1.2 Cosmoquímica	5
1.3 Origen de los elementos químicos: Nucleosíntesis estelar.....	6
2.-EFICIENCIA ESTELAR DE FORMACIÓN DE ELEMENTOS QUÍMICOS	15
2.1 Propiedades estelares	15
2.1.1 Yields estelares.....	15
2.1.2 Remanentes o cadáveres estelares.....	20
2.2 Función de masa inicial (IMF)	21
2.3 Propiedades de la población estelar.	23
2.3.1 Yields de la población estelar (Y_i).....	23
2.3.2 R (material que retorna al medio interestelar).....	25
3.-OBJETIVOS	27
3.1 Objetivo General:.....	27
3.2 Objetivos particulares:	27
4.-RESULTADOS Y ANÁLISIS	28
4.1 Yields estelares en función de la masa y metalicidad iniciales de las estrellas.....	28
4.2 Yields de la población estelar en función de la masa estelar superior formada.....	44
5.-CONCLUSIONES	59
8.-BIBLIOGRAFÍA	61
APÉNDICE A.....	64

1.-INTRODUCCIÓN

El estudio de la composición química del Universo es reciente en la historia de la astronomía (siglo XVII), si se considera que los inicios del estudio de la astronomía se remontan al año 300 a.C. Por tal motivo, en este capítulo se presentarán sólo algunos antecedentes relacionados con el enriquecimiento químico del Cosmo.

1.1 Escalas de tiempo

Debido a que este trabajo se enfoca en aspectos astronómicos y químicos, es necesario ubicar en el tiempo los eventos más significativos en estos campos, empezando desde el origen del Universo hasta el día de hoy.

El Universo se formó hace 13.75 mil millones de años o 13.75 Gaños (1 Gaño **(Ga)** = 1E9 años) en un evento llamado la Gran Explosión. El proyecto WMAP¹ (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) de la NASA estima la edad del Universo en 13.7 ± 0.2 Ga.

El Sol se formó hace unos 4.60 Ga. La forma más conocida de obtener la edad del Sol es suponer que tanto nuestra estrella como el sistema solar son casi coetáneos y, por lo tanto, la edad del Sol es semejante a aquella que presentan los meteoritos más antiguos encontrados hasta hoy, que es de 4.56 Ga (Baker et al. 2005).

También se puede estimar la edad del Sol a partir de modelos teóricos que explican los sismos frecuentes observados en la superficie de esta estrella, arrojando un valor de 4.60 ± 0.04 Ga (Houdek y Gough, 2011).

El Sol es la estrella más cercana a la Tierra y por lo tanto es la estrella que mejor conocemos. Por tal motivo la astronomía usa las propiedades solares como sistema de referencia.

¹ La WMAP es una sonda de la NASA cuya misión es medir las diferencias de temperatura que se observan en la radiación de fondo de microondas, un remanente de la gran explosión.

La masa solar es la unidad de medida más utilizada en astrofísica para cuantificar desde la masa de los objetos subestelares² hasta la masa de los supercúmulos de galaxias³. Una masa solar (M_{Sun}) es igual a $1.9891E30 \text{ kg} \sim 2 E30 \text{ kg}$ y equivale a unas 332 950 veces la masa de la Tierra (Sackmann et al. 2003).

Por otra parte, la metalicidad solar (Z) es un concepto astrofísico que se utiliza para cuantificar la abundancia de elementos más pesados que el helio en una estrella o en cualquier otro objeto astronómico. Estos elementos reciben el nombre de metales independientemente de su posición en la tabla periódica (Bromm et al. 2004).

El sistema solar y la Tierra se formaron hace unos 4.54 Ga. Podemos conocer esta fecha a partir del decaimiento radioactivo de algunos isótopos presentes en meteoritos y en rocas terrestres. Conociendo la concentración del elemento estable, N , la concentración del isótopo radiactivo, N_0 , y la vida media de dicho isótopo, λ , se puede calcular la edad de la roca, t_R , usando $t_R = \lambda^{-1} \ln(N/N_0)$.

Existen varios isótopos radiactivos cuyo decaimiento permite estimar grandes escalas de tiempo. Por ejemplo, la cascada de decaimiento típica del ^{238}U al ^{206}Pb con $\lambda = 4.47 \text{ Ga}$. También existen decaimientos directos más comunes, como del ^{40}K al ^{40}Ar y ^{40}Ca con $\lambda = 1.25 \text{ Ga}$ y del ^{234}U al ^{230}Th con $\lambda = 2.46E-4 \text{ Ga}$, todos en compuestos inorgánicos. En cambio el decaimiento del ^{14}C al ^{14}N con $\lambda = 5.73E-6 \text{ Ga}$ es usado en materia orgánica (Kamen, M.D. 1963).

Los minerales más antiguos, zircones (silicatos de zirconio ZrSiO_4), se formaron hace 4.2 Ga, mientras que las rocas terrestres más antiguas datan de hace 3.98 Ga.

La vida en la Tierra se originó hace unos 3.8 Ga, los fósiles más antiguos encontrados (de cianobacterias) datan de unos 3.5 Ga, los animales primitivos aparecieron hace unos 0.7 Ga, los primeros mamíferos surgieron unos 0.2 Ga

² Un objeto subestelar es un objeto astronómico cuya masa es menor a la masa mínima para que una esfera gaseosa colapsada sea considerada estrella (masa mínima = $0.08 M_{\text{Sun}}$).

³ Los supercúmulos son grandes agrupaciones de grupos de cúmulos de galaxias, a su vez, un cúmulo está formado por cientos o miles de galaxias.

atrás, la extinción de los dinosaurios aconteció unos 0.065 Ga antes de la actualidad y el origen de las especies Homos apareció hace unos 2.5 millones de años, o sea, hace 0.0025 Ga (Gradstein et al. 2004).

La invención de la escritura data de unos $8E-6$ Ga, la Pirámide de Kukulcán en Chichén Itzá fue construida en el siglo XII, hace unos $8E-7$ Ga, Galileo Galilei construyó el primer telescopio en 1609, hace $4E-7$ Ga, Albert Einstein publica la teoría de la relatividad en 1905, hace $1E-7$ Ga, y el World Wide Web (www) o el sistema de internet más conocido se creó en 1989, hace $2.3E-8$ Ga, antes del día de hoy (Carigi 2012).

1.2 Cosmoquímica

La cosmoquímica estudia el origen y evolución de los elementos químicos y sus isótopos en el Universo. A fin de investigar el origen de los elementos en la naturaleza, esta ciencia se concentra en el estudio de la producción de elementos químicos ligeros, principalmente en la Gran Explosión, y en la producción de elementos químicos pesados en el interior de las estrellas y en las explosiones de supernovas⁴. Con el objetivo de entender la evolución de los elementos químicos, la cosmoquímica se enfoca en la cantidad y el tipo de estrellas formadas a partir del gas interestelar, dentro del contexto de formación y evolución de las galaxias (Carigi 2012).

Si se desea analizar la evolución química del Universo, es necesario encontrar las diferencias y similitudes en la composición isotópica y elemental de las estrellas y del gas presentes dentro de las galaxias, además del gas existente entre las mismas. Para ello es imprescindible conocer las abundancias de los elementos químicos e isótopos.

La abundancia de un elemento químico i (o isótopo) se define como la cantidad relativa de dicho elemento en una muestra dada. Existen varias maneras de expresar las abundancias químicas, las más comunes son: por masa, por número,

⁴ Una supernova es la etapa final de vida de una estrella masiva (masa inicial $> 8 M_{\text{Sun}}$)

relativa al elemento más abundante de la muestra y relativa a las abundancias químicas que presenta el Sol.

Los 6 elementos más comunes en el Universo son (por orden de abundancia): H, He, O, C, Ne y N. Los elementos más abundantes, junto con los demás 92 elementos naturales de la tabla periódica, se observan en diferentes proporciones en todos los objetos del Universo, sean planetas, estrellas, gas interestelar o gas intergaláctico. Todos los elementos observados en los diferentes objetos del Universo son generados en el interior de las estrellas por procesos de nucleosíntesis.

1.3 Origen de los elementos químicos: Nucleosíntesis estelar.

La nucleosíntesis estelar es el conjunto de reacciones nucleares que tienen lugar en las estrellas durante el proceso de evolución estelar, reacciones mediante las cuales se generan nuevos núcleos atómicos a partir de núcleos ya existentes (M. Burbidge et al. 1957).

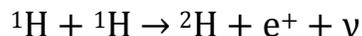
Aproximadamente el 90% de la energía producida por las estrellas viene de las reacciones de fusión de hidrógeno en helio. Más del 6% de la energía generada viene de la fusión del helio en carbono y el 4% restante viene de las otras fases de combustión (Donald D. Clayton, 1968).

Cada estrella no es capaz de crear todos y cada uno de los elementos químicos, la nucleosíntesis es un trabajo en conjunto donde se aprovecha las capacidades de cada una de las estrellas. Hay estrellas más eficientes que otras en crear determinados elementos y esa eficiencia está íntimamente relacionada con la masa de la estrella en el momento de su nacimiento.

Existen diferentes tipos de nucleosíntesis. La creación de elementos químicos en el Universo temprano se llama *nucleosíntesis primigenia*. En el primer segundo después de la Gran Explosión comienzan a formarse elementos, principalmente hidrógeno (^1H) y deuterio (^2H). El deuterio producido se destruía, ya que la temperatura era muy elevada ($T \sim 10^{10} \text{ K}$). El Universo continuó su expansión, la

temperatura del mismo disminuyó y el ^2H sobrevivió hasta los 10 segundos ($T \sim 3\text{E}9 \text{ K}$), dando origen a otros elementos ligeros. Después de los 100 segundos ($T \sim 1\text{E}9 \text{ K}$) se produjeron ^3He , ^4He , ^7Be y ^7Li . A los 4 minutos ($T \sim 8\text{E}8 \text{ K}$) la producción de elementos declina y a los 17 minutos ($T \sim 4\text{E}8 \text{ K}$) las reacciones nucleares terminan por completo ya que las barreras coulombianas⁵ de los núcleos son más fuertes que su energía térmica. Luego, la mayoría del ^7Be decayó a ^7Li y 100,000 años después la radiación deja de interactuar con la materia, logrando unirse los electrones a los núcleos, formando los primeros átomos (Steigman 2004).

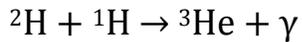
En una porción de gas que se contrae, dentro de una nube, se creará una estrella, si el centro del gas contraído alcanza una $T \sim 1\text{-}2\text{E}7 \text{ K}$ se inicia la *nucleosíntesis estelar*. Los procesos de nucleosíntesis por los que se produce He a partir de H son las cadenas protón-protón (pp), que son las reacciones de fusión más comunes que se producen en las estrellas. El balance global de los procesos es equivalente a unir 4 nucleones (2 protones + 2 neutrones) para formar un núcleo de ^4He . El primer paso conduce a la fusión de dos núcleos de ^1H a uno de ^2H , liberando un positrón y un neutrino al transformar un protón en un neutrón, esto ocurre a una $T \sim 1\text{E}7 \text{ K}$.



Este primer paso es muy lento porque depende de la interacción débil para convertir un protón en un neutrón. De hecho es el paso más lento de todas las cadenas pp, por lo que recibe el nombre de reacción limitante, ya que es el que dicta el ritmo de toda la cadena protón-núcleo.

Tras esta reacción el ^2H , producido en el primer paso, se puede fusionar con otro ^1H para producir un isótopo de helio (^3He), esto ocurre a una $T \sim 1\text{E}7 \text{ K}$.

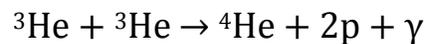
⁵ La barrera de Coulomb es la barrera de energía debida a la interacción electrostática que dos núcleos tienen que superar para que puedan acercarse lo suficiente para someterse a una reacción nuclear.



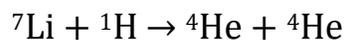
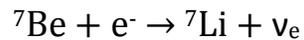
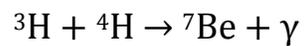
A partir de ese punto la reacción se subdivide en tres ramas diferentes que desembocan todas en la generación de un núcleo de ${}^4\text{He}$ (cadenas ppl, pplI y pplII). En la ppl, el ${}^4\text{He}$ se produce por la fusión de dos núcleos de ${}^3\text{He}$. En la pplI y pplII, el ${}^4\text{He}$ se produce en los dos caminos que el ${}^7\text{Be}$ puede tomar, Be formado a partir del ${}^3\text{He}$ y ${}^4\text{He}$ previamente producido en la ppl. En el Sol y en las estrellas de menor masa la cadena ppl se da con frecuencia del 91%, la pplI con el 9% y la pplII es la menos frecuente con un 0.1% de ocurrencia. En las estrellas más masivas que el Sol las cadenas pplI y pplII son las más dominantes (Rolfs & Rodney 1988).

A continuación se muestran estas cadenas.

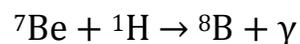
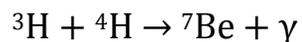
Cadena ppl ($T \sim 1-1.4\text{E}7$ K):



Cadena pplI ($T \sim 1.4-2.3\text{E}7$ K):



Cadena pplII ($T > 2.3\text{E}7$ K):



Todas las estrellas sintetizan He, por algunas de estas cadenas, durante diferentes etapas de su evolución estelar, la cual depende esencialmente de la masa con la que nacieron. Las estrellas nacen con masas muy variadas, entre 0.1 y $100 M_{\text{Sun}}$, aproximadamente.

La evolución estelar depende de la masa inicial de la estrella, principalmente, del contenido de elementos pesados (metalicidad) y de la proximidad de otra estrella, secundariamente. En este trabajo se llamarán *estrellas de baja masa (LMS⁶)* a aquéllas con masa inicial menor a unas $3 M_{\text{Sun}}$, *estrellas de masa intermedia (IMS⁷)* a aquellas con masa inicial entre 3 y $8 M_{\text{Sun}}$ y *estrellas masivas (MS⁸)* a aquéllas con masas mayores a $8 M_{\text{Sun}}$.

Las estrellas de baja masa (LMS) y las estrellas de masa intermedia (IMS) producen principalmente He, C, N y aproximadamente la mitad de los elementos más pesados que el Fe, los cuales son sintetizados en el interior de las estrellas y son expulsados al medio interestelar por medio de vientos estelares y en la etapa final de la estrella, llamada nebulosa planetaria.

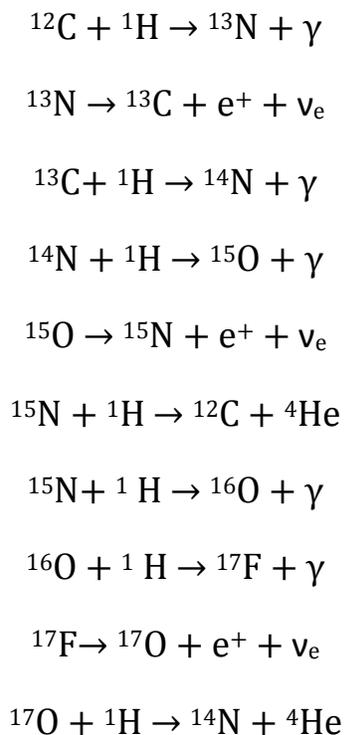
Si la estrella tiene metalicidad inicial baja, la producción de He se lleva a cabo en el centro estelar a través de una de las 3 cadenas protón-protón (dependiendo de la masa estelar). Pero si la estrella tiene metalicidad alta y masa mayor a $2 M_{\text{Sun}}$, la generación de ^4He se realiza a través del ciclo CNO: un conjunto de una decena de reacciones nucleares entre C, N y O (en forma elemental e isótopos). En este ciclo el 98% de los núcleos de C y O se convierten en ^{14}N .

El ciclo CNO se enuncia a continuación:

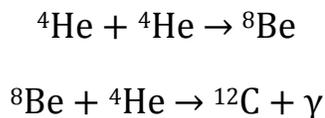
⁶ LMS del Inglés “low mass stars” trad. “estrellas de baja masa”

⁷ IMS del Inglés “intermediate mass stars” trad. “estrellas de masa intermedia”

⁸ MS del Inglés “massive stars” trad. “estrellas masivas”



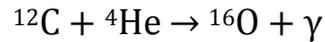
Cuando todo el H del núcleo estelar se ha convertido en He, el centro de la estrella se contrae y se calienta hasta $T \sim 2E8$ K. A esta temperatura comienza una reacción triple-alfa⁹, donde un par de partículas α se fusionan y el producto se une con una tercera partícula α para formar un núcleo de ${}^{12}\text{C}$:



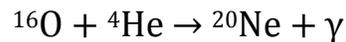
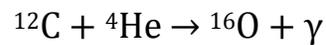
Las estrellas masivas (MS) producen la mayoría de los elementos químicos y su producción nucleosintética se realiza en 2 períodos: desde su nacimiento hasta la etapa de presupernova (en el interior estelar) y en los últimos segundos de vida (en la etapa de supernova). Los elementos generados son expulsados al medio interestelar con los vientos estelares (más importantes mientras más metálica sea la estrella) y cuando estas estrellas terminan su vida como supernovas.

⁹ El proceso alfa es un tipo de reacción de fusión nuclear por el cual las estrellas convierten helio en elementos más pesados. Una partícula alfa es un núcleo de ${}^4\text{He}$, los elementos alfa son los elementos que tienen una masa atómica con múltiplos enteros de 4 como Ne, Mg, Si, Ar, Ca y Ti.

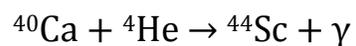
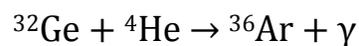
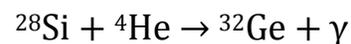
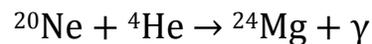
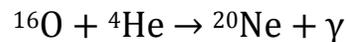
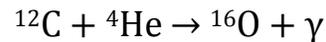
En estas estrellas masivas, la generación de He, C y N se realiza por reacciones nucleares similares a las explicadas para las estrellas de baja masa. El ^{16}O , el elemento pesado más abundante en el Universo, es sintetizado mayormente por estas estrellas al fusionar ^{12}C con una partícula α :



El ^{20}Ne , el quinto elemento más abundante en el Cosmos, es producido en estrellas masivas a partir de ^{12}C en un proceso alfa:



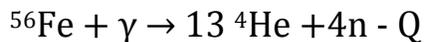
El ^{48}Ti es un ejemplo de un elemento alfa pesado, es decir, se produce en estrellas masivas al fusionar ^{12}C con varias partículas alfa, su reacción de nucleosíntesis se enuncia a continuación:



Las fases de combustión en el interior estelar de una estrella masiva forman una estructura de “capa de cebolla”, de tal manera que se fusionan elementos más pesados a radios estelares menores. A $T \sim 5\text{-}8\text{E}8$ K, se realiza la fusión de 2 núcleos de ^{12}C para formar ^{23}Na , ^{20}Ne y principalmente ^{24}Mg . Cuando $T \sim 1.4\text{E}9$ K, se lleva a cabo la combustión de 2 núcleos de ^{16}O para sintetizar ^{32}Si , ^{31}P , ^{24}Mg y especialmente ^{28}Si . A $T \sim 3\text{-}5\text{E}9$ K los núcleos “semilla” de ^{24}Mg y ^{28}Si se fusionan con partículas α sintetizando ^{36}Ar , ^{40}Ca , ^{44}Sc , ^{48}Ti , ^{52}Cr y principalmente ^{56}Ni que se desintegra en ^{56}Fe por decaimiento beta¹⁰:



A temperaturas mayores de $5\text{E}9$ K, el ^{56}Fe se fotodesintegra a 13 núcleos de ^4He :



Esta reacción es endotérmica, el radio del núcleo estelar se contrae por efecto de la gravedad de unos 1000 km a 1 km, aproximadamente, en el lapso de milisegundos, creándose una espectacular supernova. En el borde del núcleo colapsado se forma una onda de choque que se dirige hacia fuera, propagándose a través de la envolvente estelar, aumentando la temperatura de las capas externas de dicha envolvente hasta temperaturas de fusión nuclear, generando combustión termonuclear violenta, llamada *Nucleosíntesis explosiva*. Los productos principales de esta nucleosíntesis son isótopos y elementos de Al, Si, S, Cl, Ar, Ca, Ti, Cr y Fe.

La *formación de elementos con número másico alto* (mayor que 65 uma) requieren $T > 5\text{-}6\text{E}9$ K. A esas temperaturas es más probable la fotodesintegración que la fusión de elementos. Por lo tanto la síntesis de núcleos muy pesados se realiza generalmente a partir de un núcleo “semilla” de ^{56}Fe que captura neutrones, debido a que este proceso no depende de la barrera coulombiana. La medida en

¹⁰ El decaimiento beta es un proceso mediante el cual un núclido inestable emite una partícula beta (un electrón o positrón) para compensar la relación de neutrones y protones del núcleo atómico.

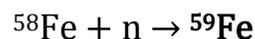
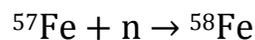
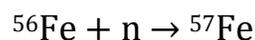
la que la captura de neutrones se mueve hacia arriba en los números de masa de los elementos de la tabla periódica, se determina esencialmente por la tasa de producción de neutrones. El rendimiento cuantitativo también es proporcional a la cantidad de hierro en la distribución de abundancia inicial de la estrella, debido a que el hierro es el "la semilla" para la captura de neutrones.

Dependiendo del tiempo de vida de un núcleo (τ_n) frente a la captura de neutrones (flujo), se han reconocido 2 diferentes procesos de captura de neutrones: procesos *s* (slow trad. lento) y procesos *r* (rapid trad. rápido).

Los procesos *s*, con $\tau_n > 10$ años y un flujo promedio de 10^8 neutrones $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, implican la captura de un solo neutrón que produce un núcleo estable o un núcleo que decae mediante desintegración beta a un núcleo estable antes de que se pueda producir otra captura neutrónica. Estos procesos tienen lugar durante la fase de quemado de helio, tanto en estrellas de baja masa (LMS) y estrellas de masa intermedia (IMS) como en estrellas masivas (MS) (Matteucci 2012).

Algunos elementos e isótopos obtenidos por procesos *s* son: ^{59}Co , ^{63}Ni , ^{64}Cu , ^{64}Ni y ^{209}Bi .

El ^{59}Co es un ejemplo de un elemento formado a partir de ^{56}Fe mediante un proceso *s*, su reacción de nucleosíntesis se enuncia a continuación:

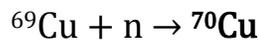
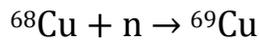
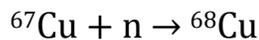
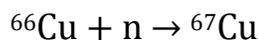
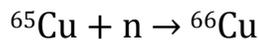


Las especies ^{56}Fe , ^{57}Fe y ^{58}Fe son isótopos estables, mientras que el ^{59}Fe es un isótopo inestable que sufre un decaimiento beta formando una nueva especie estable, en este caso el ^{59}Co .

Los procesos r , con $\tau_n \sim 1$ segundo y un flujo $> 10^{20}$ neutrones $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, implican una captura múltiple de neutrones, que produce un núcleo inestable que rápidamente decae mediante una serie de desintegraciones beta hasta llegar a un isótopo estable. Estos procesos tienen lugar en eventos explosivos como en las supernovas, que son la etapa final de vida de las estrellas masivas (MS) (Matteucci 2012).

Algunos elementos e isótopos obtenidos por procesos r son: ^{61}Co , ^{70}Zn , ^{90}Th , ^{92}U y ^{94}Pu .

El ^{70}Zn es un ejemplo de un elemento formado a partir de ^{65}Cu (que a su vez se obtiene por decaimiento beta de ^{65}Ni , obtenido por reacciones de captura de neutrones a partir del núcleo “semilla” de ^{56}Fe) mediante un proceso r , su reacción de nucleosíntesis se enuncia a continuación:



Las especies ^{65}Cu , ^{66}Cu , ^{67}Cu , ^{68}Cu y ^{69}Cu son isótopos estables, mientras que el ^{70}Cu es un isótopo inestable que sufre un decaimiento beta formando una nueva especie estable, en este caso el ^{70}Zn .

2.-EFICIENCIA ESTELAR DE FORMACIÓN DE ELEMENTOS QUÍMICOS

2.1 Propiedades estelares

2.1.1 Yields estelares

Los yields estelares, representados como p_i , son la fracción de masa procesada en forma del elemento i y eyectada por una estrella de masa inicial m . Los yields estelares se obtienen a partir de modelos de evolución estelar, los cuales dependen, entre varios procesos, de la nucleosíntesis de la especie i . Los yields estelares representan un ingrediente fundamental para calcular la evolución química galáctica (Matteucci 2012).

Las estrellas de baja masa ($m < 8 M_{\text{Sun}}$) enriquecen químicamente el medio interestelar a través de dos eventos: el primero se realiza durante la mayor parte de la vida de la estrella (vientos estelares) y el segundo en mucho menor tiempo durante la etapa final de la estrella (nebulosa planetaria). Existen en la literatura diversos trabajos referentes al cálculo de yields estelares en este tipo de estrellas. Entre los más recientes e importantes tenemos:

- Marigo (2001)
- Karakas & Lattanzio (2007)
- Karakas (2010)

Los yields de baja masa utilizados en este trabajo fueron tomados completamente de Karakas (2010), en donde se publican los yields estelares de 61 especies químicas, enunciadas en la tabla 3.1. Karakas calculó estos yields para estrellas con masas iniciales entre 1 y 6 M_{Sun} y cuatro valores de metalicidad inicial: 1E-4, 4E-3, 8E-3 y 2E-2 (metalicidad solar).

^1H	^2H	^3He	^4He	^7Li	^7Be	^8B	^{12}C	^{13}C	^{14}C	^{13}N
^{14}N	^{15}N	^{15}O	^{16}O	^{17}O	^{18}O	^{17}F	^{18}F	^{19}F	^{20}Ne	^{21}Ne
^{22}Ne	^{22}Na	^{23}Na	^{24}Na	^{24}Mg	^{25}Mg	^{26}Mg	^{27}Mg	^{26}Al	^{27}Al	^{28}Al
^{28}Si	^{29}Si	^{30}Si	^{31}Si	^{32}Si	^{31}P	^{32}P	^{33}P	^{32}S	^{33}S	^{34}S
^{35}S	^{54}Fe	^{55}Fe	^{56}Fe	^{57}Fe	^{58}Fe	^{59}Fe	^{60}Fe	^{61}Fe	^{59}Co	^{60}Co
^{61}Co	^{58}Ni	^{59}Ni	^{60}Ni	^{61}Ni	^{62}Ni					

Tabla 2.1. Especies químicas consideradas en Karakas (2010)

Las estrellas masivas ($m > 8 M_{\text{Sun}}$) enriquecen químicamente el medio interestelar a través de dos eventos: el primero se realiza durante la mayor parte de la vida de la estrella (vientos estelares) y el segundo en mucho menor tiempo durante la etapa final de la estrella (explosión de supernovas). Los trabajos más recientes e importantes referentes al cálculo de yields estelares en este tipo de estrellas se enuncian a continuación:

- Maeder, Meynet & Hirschi (2000)
- Chieffi & Limongi (2004)
- Kobayashi et al. (2006)
- Nomoto et al. (2013)

Los yields de estrellas masivas utilizados en este trabajo fueron tomados principalmente de Kobayashi et al. (2006), en donde se publicaron los yields estelares de 82 especies químicas, enunciadas en la tabla 3.2. Kobayashi calculó estos yields para estrellas con masas iniciales entre 13 y 40 M_{Sun} y cuatro valores de metalicidad inicial: 0, 1E-3, 4E-3 y 2E-2 (metalicidad solar).

¹ H	² H	³ He	⁴ He	⁶ Li	⁷ Li	¹⁰ B	¹¹ B	¹² C	¹³ C	¹⁴ N
¹⁵ N	¹⁶ O	¹⁷ O	¹⁸ O	¹⁹ F	²⁰ Ne	²¹ Ne	²² Ne	²³ Na	²⁴ Mg	²⁵ Mg
²⁶ Mg	²⁷ Al	²⁸ Si	²⁹ Si	³⁰ Si	³¹ P	³² S	³³ S	³⁴ S	³⁶ S	³⁵ Cl
³⁷ Cl	³⁶ Ar	³⁸ Ar	⁴⁰ Ar	³⁹ K	⁴⁰ K	⁴¹ K	⁴⁰ Ca	⁴² Ca	⁴³ Ca	⁴⁴ Ca
⁴⁶ Ca	⁴⁸ Ca	⁴⁵ Sc	⁴⁶ Ti	⁴⁷ Ti	⁴⁸ Ti	⁴⁹ Ti	⁵⁰ Ti	⁵⁰ V	⁵¹ V	⁵⁰ Cr
⁵² Cr	⁵³ Cr	⁵⁴ Cr	⁵⁵ Mn	⁵⁴ Fe	⁵⁶ Fe	⁵⁷ Fe	⁵⁸ Fe	⁵⁹ Co	⁵⁸ Ni	⁶⁰ Ni
⁶¹ Ni	⁶² Ni	⁶⁴ Ni	⁶³ Cu	⁶⁵ Cu	⁶⁴ Zn	⁶⁶ Zn	⁶⁷ Zn	⁶⁸ Zn	⁷⁰ Zn	⁶⁹ Ga
⁷¹ Ga	⁷⁰ Ge	⁷² Ge	⁷³ Ge	⁷⁴ Ge						

Tabla 2.2. Especies químicas consideradas en Kobayashi et al. (2010)

Debido a que la rotación estelar fue fundamental en las primeras estrellas y el viento estelar es más intenso en las estrellas metálicas, los yields de Kobayashi et al. fueron mejorados al añadirles yields que sí consideran estos dos procesos estelares. Estas mejoras se hicieron para cuatro elementos: He, C, N y O y dos metalicidades: $Z=0$ y $2E-2$. Específicamente, para $Z=0$ se suman los yields con rotación estelar, calculados por Hirshi (2007) y para $Z=2E-2$ se añade un promedio de yields que consideran vientos estelares, obtenidos por Maeder (1992) y Hirshi, Meynet & Maeder (2002). Estas modificaciones se confirmaron como válidas por Kobayashi, Karakas y Umeda (2011).

Robles et al. 2013 calculó una matriz de rendimientos estelares, en base a los yields anteriormente explicados. Con el fin de generar la matriz completa, los yields fueron interpolados linealmente en metalicidad y en masa y también se extrapolaron, cuando fue necesario, adoptando los valores extremos disponibles.

Particularmente, se generó una matriz con 106 especies químicas, enunciadas en la tabla 3.3, y seis valores de metalicidad inicial: $0,1E-4$, $1E-3$, $4E-3$, $8E-3$ y $2E-2$. Para estrellas entre 6 y 8 M_{Sun} se extrapolan linealmente en masa los yields estelares de 6 M_{Sun} de Karakas (2010), mientras que para estrellas entre 8 y 13 M_{Sun} se extrapolan linealmente en masa los yields estelares de 13 M_{Sun} de Kobayashi et al. (2006).

¹ H	² H	³ He	⁴ He	⁶ Li	⁷ Li	⁷ Be	⁸ B	¹⁰ B	¹¹ B	¹² C
¹³ C	¹⁴ C	¹³ N	¹⁴ N	¹⁵ N	¹⁵ O	¹⁶ O	¹⁷ O	¹⁸ O	¹⁷ F	¹⁸ F
¹⁹ F	²⁰ Ne	²¹ Ne	²² Ne	²² Na	²³ Na	²⁴ Na	²⁴ Mg	²⁵ Mg	²⁶ Mg	²⁷ Mg
²⁶ Al	²⁷ Al	²⁸ Al	²⁸ Si	²⁹ Si	³⁰ Si	³¹ Si	³² Si	³¹ P	³² P	³³ P
³² S	³³ S	³⁴ S	³⁵ S	³⁶ S	³⁵ Cl	³⁷ Cl	³⁶ Ar	³⁸ Ar	⁴⁰ Ar	³⁹ K
⁴⁰ K	⁴¹ K	⁴⁰ Ca	⁴² Ca	⁴³ Ca	⁴⁴ Ca	⁴⁶ Ca	⁴⁸ Ca	⁴⁵ Sc	⁴⁶ Ti	⁴⁷ Ti
⁴⁸ Ti	⁴⁹ Ti	⁵⁰ Ti	⁵⁰ V	⁵¹ V	⁵⁰ Cr	⁵² Cr	⁵³ Cr	⁵⁴ Cr	⁵⁵ Mn	⁵⁴ Fe
⁵⁵ Fe	⁵⁶ Fe	⁵⁷ Fe	⁵⁸ Fe	⁵⁹ Fe	⁶⁰ Fe	⁶¹ Fe	⁵⁹ Co	⁶⁰ Co	⁶¹ Co	⁵⁸ Ni
⁵⁹ Ni	⁶⁰ Ni	⁶¹ Ni	⁶² Ni	⁶⁴ Ni	⁶³ Cu	⁶⁵ Cu	⁶⁴ Zn	⁶⁶ Zn	⁶⁷ Zn	⁶⁸ Zn
⁷⁰ Zn	⁶⁹ Ga	⁷¹ Ga	⁷⁰ Ge	⁷² Ge	⁷³ Ge	⁷⁴ Ge	Z			

Tabla 2.3. Especies químicas y metalicidad (*Z*) consideradas en Robles et al. (2013). Las especies en color naranja son las especies publicadas en Karakas (2010), las especies en color verde son las especies publicadas en Kobayashi et al. (2006) y las especies en color azul son las especies que están tanto en Karakas (2010) como en Kobayashi et al. (2006).

Donde *Z* se le denomina metalicidad (ver sección 2.4) y representa la suma de todos los elementos más pesados que el helio.

En este trabajo se consideran las 106 especies químicas generadas en Robles et al. (2013), pero el análisis de resultados se concentra en 9 especies: los elementos más abundantes en el Universo (¹H, ⁴He, ¹²C, ¹⁴N, ¹⁶O y ²⁰Ne), un elemento *α* pesado (⁴⁸Ti), un elemento *s* (⁵⁹Co) y un elemento *r* (⁷⁰Zn). Todos estos conforman una muestra representativa en astronomía y astrobiología¹¹(si se desea conocer los datos de las especies restantes, el lector puede pedir la información al correo electrónico: ikaquark@gmail.com).

El ¹H, ⁴He, ¹²C, ¹⁴N, ¹⁶O y ²⁰Ne son los primeros 6 elementos más abundantes en el Universo (ver tabla 3.4).

De estos 6 elementos, el ¹H, ¹²C, ¹⁴N y ¹⁶O son también elementos biogénicos primarios, es decir, son elementos indispensables para formar las biomoléculas

¹¹ Ciencia que hace uso principalmente de una combinación de las disciplinas de astronomía, biología y geología para el estudio de la existencia, origen, presencia e influencia de la vida en el conjunto del Universo.

orgánicas. El ^{12}C es el elemento biogénico más importante, debido a su capacidad de formar largas cadenas.

Isótopo	Fracción de masa en ppm en el Universo
^1H	705.700
^4He	275.200
^{16}O	5.920
^{12}C	3.032
^{20}Ne	1.548
^{14}N	1.105

Tabla 2.4. Fracción de masa en ppm (partes por millón) de los elementos más abundantes en el Universo (Suess & Urey, 1956).

Además de los 6 elementos más abundantes en el Universo, este trabajo se enfoca en el ^{48}Ti (α pesado) y el ^{59}Co (s), ya que son elementos refractarios, fundamentales para la formación de planetas (o lunas) terrestres o acuáticos, donde la vida, como la conocemos, puede surgir y desarrollarse.

En contexto astrofísico los materiales refractarios son definidos como materiales que tienen una temperatura de equilibrio de condensación¹² relativamente alta. El grupo de materiales refractarios incluye elementos y compuestos como metales y silicatos que componen: a) la mayor parte de los planetas tipo Tierra y los asteroides en el cinturón principal¹³ del Sistema Solar y b) una menor parte de los planetas gigantes, sus lunas, objetos transneptunianos¹⁴ y asteroides exteriores.

Por otro lado el ^{70}Zn (r) no tiene alguna particularidad astronómica o astrobiológica, pero al igual que el ^{48}Ti (α pesado) y el ^{59}Co (s), tiene características específicas que lo convierten en uno de los mejores ejemplos para

¹² Las temperaturas de condensación son las temperaturas en las que el 50% del elemento están en forma de un sólido (roca) bajo una presión de 10^{-4} bar.

¹³ Región comprendida aproximadamente entre las órbitas de Marte y Júpiter.

¹⁴ Un objeto transneptuniano es cualquier objeto del Sistema Solar cuya órbita se ubica parcial o totalmente más allá de la órbita del planeta Neptuno.

el análisis: a) es uno de los elementos más pesados con los que se cuenta en este trabajo y b) su reacción de nucleosíntesis es sencilla de obtener y explicar.

2.1.2 Remanentes o cadáveres estelares.

Estos objetos conforman el punto final de la evolución estelar. Una estrella compensa la presión hacia el centro estelar, debido a la autogravedad, con la presión hacia el exterior estelar, debido a la radiación producida por las reacciones de nucleosíntesis en el interior de la estrella. Cuando en la estrella se detienen las reacciones nucleares exotérmicas, la presión del gas en el interior no puede soportar el peso de la estrella, y ésta colapsa en un estado más denso, estado conocido como remanente o cadáver estelar (Tauris & van den Heuvel 2003).

Dependiendo de la masa inicial de la estrella y de cuanta masa haya perdido a lo largo de su vida, el fin de las reacciones nucleares trae consigo la aparición de uno u otro tipo de remanente estelar.

Las estrellas de baja masa (LMS) y las estrellas de masa intermedia (IMS) terminan su vida como nebulosas planetarias (ver sección 2.3). En el centro de la nebulosa planetaria queda el núcleo desnudo de la estrella, como un cadáver estelar de masa menor que $1.4 M_{\text{Sun}}$, llamado enana blanca¹⁵

Las estrellas masivas (MS) terminan su vida como supernovas (ver sección 2.3). El núcleo desnudo de la estrella se convierte en una estrella de neutrones¹⁶ si la masa de ese cadáver estelar está entre 1.4 y $3 M_{\text{Sun}}$. En cambio, el cadáver será un hoyo negro, si el núcleo tiene una masa mayor a $3 M_{\text{Sun}}$.

La fracción del remanente, en este trabajo expresada como mr/m , representa la fracción de masa inicial estelar, que constituye el cadáver de una estrella. La fracción del remanente (al igual que los yields estelares) se obtiene a partir de modelos de evolución estelar.

¹⁵ Las enanas blancas son un tipo de remanente estelar. Son estrellas muy pequeñas y calientes, pero de masas comparables a las del Sol. Típicamente su radio es del orden de una centésima parte del radio solar y sus elevadas temperaturas hacen que generen un brillo color blanco.

¹⁶ Una estrella de neutrones es un tipo de remanente estelar y como su nombre lo indica, están compuestas principalmente de neutrones, más otro tipo de partículas como protones, electrones, piones y kaones.

Las m_r/m se toman de Karakas (2010) o de Kobayashi et al. (2006), según la masa inicial de la estrella.

2.2 Función de masa inicial (IMF¹⁷)

La función de masa inicial es la distribución en masa de las estrellas formadas en un brote estelar. La IMF representa una función de probabilidad de formar estrellas según la masa estelar inicial.

Las propiedades y evolución de una estrella están estrechamente relacionadas con su masa inicial, por lo que la IMF es una herramienta de diagnóstico importante para los astrofísicos que estudian grandes cantidades de estrellas. La IMF es relativamente invariante de un grupo de estrellas a otro, aunque algunas observaciones sugieren que la IMF es diferente en diferentes ambientes galácticos (Geha et al. 2013).

Los principales trabajos en la literatura referentes al cálculo de la IMF se enuncian a continuación:

- Salpeter (1955)
- Scalo (1986)
- Kroupa et al. (1993)
- Kroupa (2001)
- Chabrier (2003)
- Kroupa et al. (2013)
- Thies et al. (2015)

En la figura 3.1 se muestra la gráfica de los modelos de Salpeter (1955), Kroupa et al. (1993) y Kroupa (2001) de la IMF desde 0.1 hasta 100 M_{Sun} , el eje X es la masa inicial de la estrella, medida en masas solares, mientras que el eje Y representa el número de estrellas que se forman por cada intervalo de masa.

¹⁷ IMF del Inglés “initial mass function”

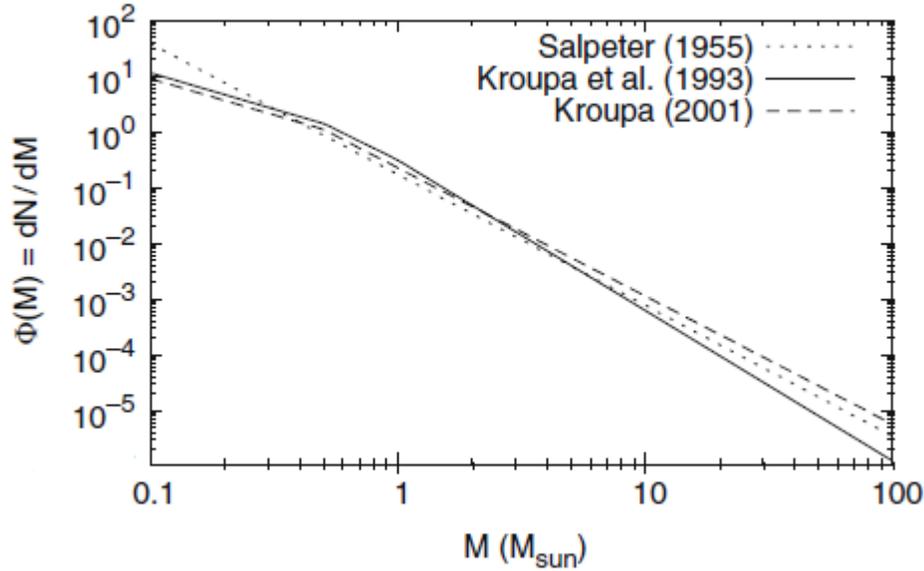


Figura 2.1: Gráfica IMF vs M para los modelos de Salpeter (1955), Kroupa et al. (1993) y Kroupa (2001). Figura tomada de Mateucci (2012).

El comportamiento que se puede observar, de manera general, es que en un brote de formación estelar se forman mucho más LMS, le siguen las IMS y mucho menos MS. Nótese que la escala es logarítmica.

La IMF usada en este trabajo es la de Kroupa et al. (1993), ya que con sólo esta IMF los modelos de evolución química pueden reproducir las propiedades químicas del disco de la Vía Láctea y de la Vecindad Solar, debido a que esta IMF predice un número menor de MS (Carigi & Peimbert 2011).

La IMF de Kroupa et al. (1993) está representada por la ecuación 3.1. Esta IMF debe ser una función continua y debe ser extrapolada y normalizada para los casos específicos de los límites de masa.

$$\Phi(m) = \Phi_0 \begin{cases} C_1 m^{-1.3} & 0.1 - 0.5 \\ C_2 m^{-2.3} & 0.5 - 1 \\ C_3 m^{-2.7} & 1 - m_{sup} \end{cases} \quad (3.1)$$

Donde $\emptyset(m)$ es la función de masa inicial, \emptyset_0 es la constante de normalización, las C_i 's son las constantes de continuidad de la función y m_{sup} es la masa superior estelar considerada.

Primero se obtienen las constantes de continuidad de la función. Donde C_1 tiene un valor de 2, mientras que C_2 y C_3 tienen un valor de 1, estos valores numéricos son deducidos de la ecuación 3.1 en los valores de corte.

Posteriormente se obtiene la constante de normalización, integrando la ecuación 3.1 desde 0.1 hasta la m_{sup} , quedando \emptyset_0 de la siguiente manera:

$$\emptyset_0 = \left[\int_{0.1}^{0.5} C_1 m m^{-1.3} dm + \int_{0.5}^1 C_2 m m^{-2.3} dm + \int_1^{m_{sup}} C_3 m m^{-2.7} dm \right]^{-1} \quad (3.2)$$

Hemos aproximado a $0.1 M_{Sun}$ la masa inferior para que una esfera gaseosa colapsada sea considerada una estrella, esto es, para que la combustión de hidrógeno se lleve a cabo en el centro gaseoso. El valor más común reportado en la literatura es $0.08 M_{Sun}$ (Zaninetti 2013).

2.3 Propiedades de la población estelar.

2.3.1 Yields de la población estelar (Y_i)

Los yields de la población estelar, también llamados yields netos o yields integrados, representan la eficiencia que tiene una población estelar en producir elementos químicos. El formalismo básico se describe detalladamente en el trabajo pionero de Tinsley (1980), donde deduce la expresión matemática para el cálculo de los yields netos, la cual se escribe a continuación:

$$Y_i = \int_1^{m_{sup}} m p_i(m) \emptyset(m) dm \quad (3.3)$$

Donde Y_i es el yield neto del elemento i , m es la masa inicial de la estrella, p_i es el yield estelar del elemento i (ver sección 3.1) y $\varnothing(m)$ es la IMF (ver sección 3.2).

Existen en la literatura diversos trabajos referentes al cálculo de yields netos, entre los más recientes e importantes tenemos:

- Maeder (1992)
- Kobayashi et al. (2006)
- Franco & Carigi (2008)
- Hernández-Martínez et al. (2011)

En esta tesis se realizó el cálculo de yields netos de LMS, IMS y MS, por lo cual la integral se aplica a tres intervalos de masa distintos, para cada uno de los tipos de estrellas consideradas:

$$Y_{i_{LMS}} = \int_1^3 m p_i(m) \varnothing(m) dm \quad (3.4)$$

$$Y_{i_{IMS}} = \int_3^8 m p_i(m) \varnothing(m) dm \quad (3.5)$$

$$Y_{i_{MS}} = \int_8^{m_{sup}} m p_i(m) \varnothing(m) dm \quad (3.6)$$

En este trabajo se obtienen los yields netos de toda la población estelar sencillamente sumando los yields de las 3 poblaciones que lo forman.

2.3.2 R (material que retorna al medio interestelar).

Los yields netos están directamente relacionados con R^{18} el cual representa todo el gas eyectado por todas las estrellas que mueren de una población estelar completa. El R está conformado por todos los elementos químicos producidos por las estrellas y por todos los no producidos (aquellos elementos químicos existentes en la nube progenitora donde se formó la población estelar). La expresión matemática para el cálculo de R (igual que la los yields netos Y_i), se describe detalladamente en el trabajo pionero de Tinsley (1980) y se escribe a continuación:

$$R = \int_1^{m_{sup}} (m - mr) \varnothing(m) dm \quad (3.7)$$

Donde m es la masa de la estrella, mr la masa del remanente estelar y $\varnothing(m)$ es la IMF(ver sección 3.2).

Existen en la literatura diversos trabajos referentes al cálculo de los R , en este caso, son los mismos trabajos que se enuncian para los yields netos (Y_i).

De manera análoga a la ecuación 8, las expresiones matemáticas para los R 's, según el tipo de estrellas consideradas, se enuncian a continuación:

$$R_{LMS} = \int_1^3 (m - mr) \varnothing(m) dm \quad (3.8)$$

$$R_{IMS} = \int_3^8 (m - mr) \varnothing(m) dm \quad (3.9)$$

$$R_{MS} = \int_8^{m_{sup}} (m - mr) \varnothing(m) dm \quad (3.2.1)$$

¹⁸ R de "return" trad. retorno (material que retorna al medio interestelar). R es el complemento de los remanentes estelares (mr/m). Ver sección 3.1.2

En este trabajo se obtienen los R de toda la población estelar sencillamente sumando los R de las 3 poblaciones que lo forman.

3.-OBJETIVOS

3.1 Objetivo General:

Contabilizar la aportación de las estrellas de baja masa (LMS), estrellas de masa intermedia (IMS) y estrellas masivas (MS) al enriquecimiento químico del medio interestelar. El estudio se concentra en algunos de los elementos químicos más representativos en astronomía y astrobiología: los elementos más abundantes en el Universo (^1H , ^4He , ^{12}C , ^{14}N , ^{16}O y ^{20}Ne), un elemento α pesado (^{48}Ti), un elemento s (^{59}Co) y un elemento r (^{70}Zn).

3.2 Objetivos particulares:

- Obtener las propiedades químicas de las poblaciones estelares clasificadas según su masa. Esto es, calcular los yields netos Y_i (la eficiencia de sintetizar un determinado elemento químico) y los R_s (la masa eyectada al medio interestelar) de las propiedades estelares con base en los intervalos de masa para los 3 tipos de estrellas considerados en este trabajo (LMS+IMS+MS). Los yields netos serán calculados para 106 especies químicas y para 6 valores de metalicidad estelar inicial (Z_i).
- Conocer cómo cambia la aportación de los diferentes tipos de estrellas según la masa estelar superior formada en un brote. Calculando las propiedades químicas de las poblaciones estelares aumentando el límite de masa superior (m_{sup}) de la función de masa inicial IMF (distribución en masa de las estrellas formadas en un brote). Se eligieron 7 valores diferentes de m_{sup} para el cálculo (10, 20, 30, 40, 60, 80 y 100 M_{Sun}).

4.-RESULTADOS Y ANÁLISIS

El presente análisis de resultados se hará con base en los elementos representativos enunciados en los objetivos de este trabajo (ver sección 3.1), añadiendo también la fracción del remanente (mr/m) y Z (que representa la suma de todos los elementos más pesados que el helio).

A continuación se enuncian los resultados obtenidos ordenados en orden cronológico:

4.1 Yields estelares en función de la masa y metalicidad iniciales de las estrellas.

A fin de conocer la contribución de las estrellas a la química del Universo, se realizaron las gráficas de la fracción del remanente (mr/m) y de los yields estelares (p_i), para las 106 especies químicas. Esto para poder analizar qué tipos de estrellas, en función de su masa inicial (m) y de su metalicidad inicial (Z), son más eficientes para producir especies químicas.

De ahora en adelante nombraremos a la fracción del remanente (mr/m) como un p_i más, es decir, la metodología aplicada a las 106 especies químicas es la misma usada para los mr/m .

Se realizaron 3 tipos de gráficas para cada uno de los p_i :

- a) p_i vs m : Este tipo de gráfica lineal es muy útil para estudiar valores de p_i con sólo 1 o 2 órdenes de magnitud de diferencia entre ellos.

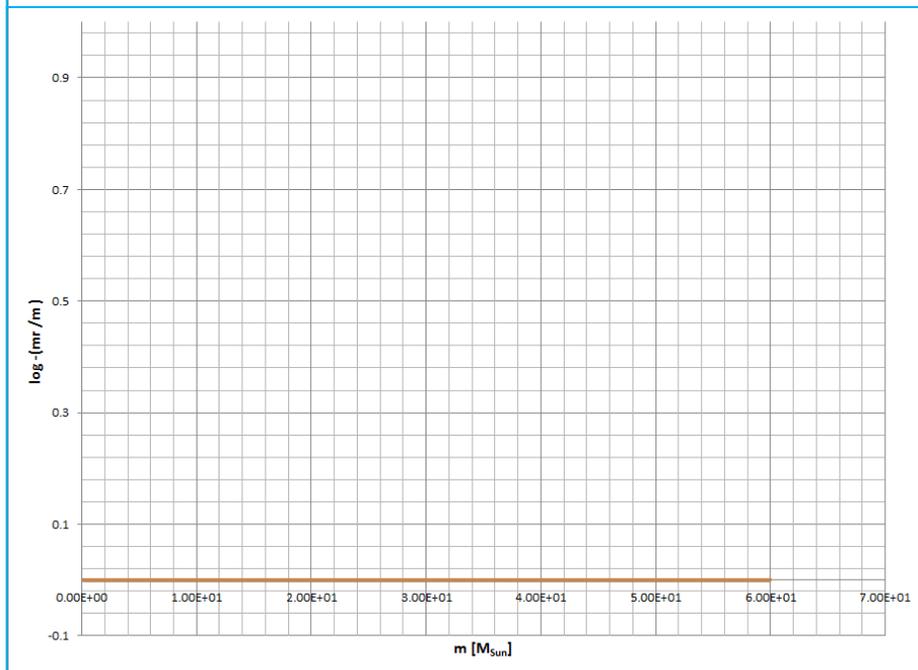
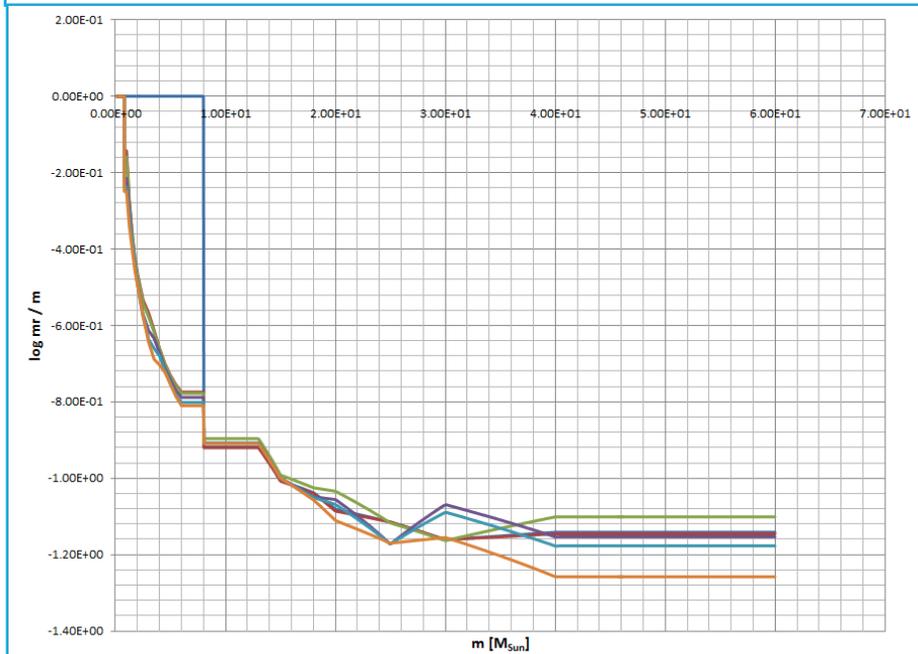
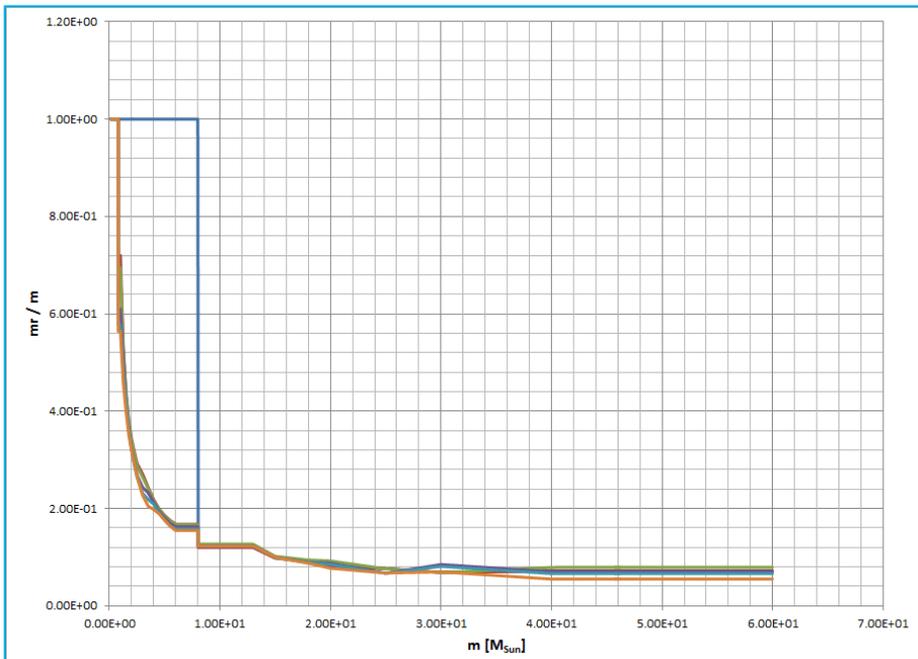
Si un valor de p_i pareciera cero se debe a alguna de las siguientes causas:

- Los valores efectivamente sean nulos.
- Los valores negativos o positivos de p_i tengan 3 o más ordenes de magnitud de diferencia entre ellos.

- b) $\log p_i$ vs m : Este tipo de gráfica, logarítmica, es muy útil para estudiar valores de p_i en un amplio rango de valores positivos, diferentes de cero, y para poder observar con más detalle valores numéricos pequeños positivos. Ambos valores debido a las propiedades matemáticas de la función logarítmica.
- c) $\log -p_i$ vs m : Al utilizar el logaritmo del valor negativo de los p_i podemos observar exclusivamente los valores de p_i que son negativos.

De la figura 4.1 a la 4.11 se muestran las gráficas de los p_i representativos ordenados en orden creciente de número atómico.

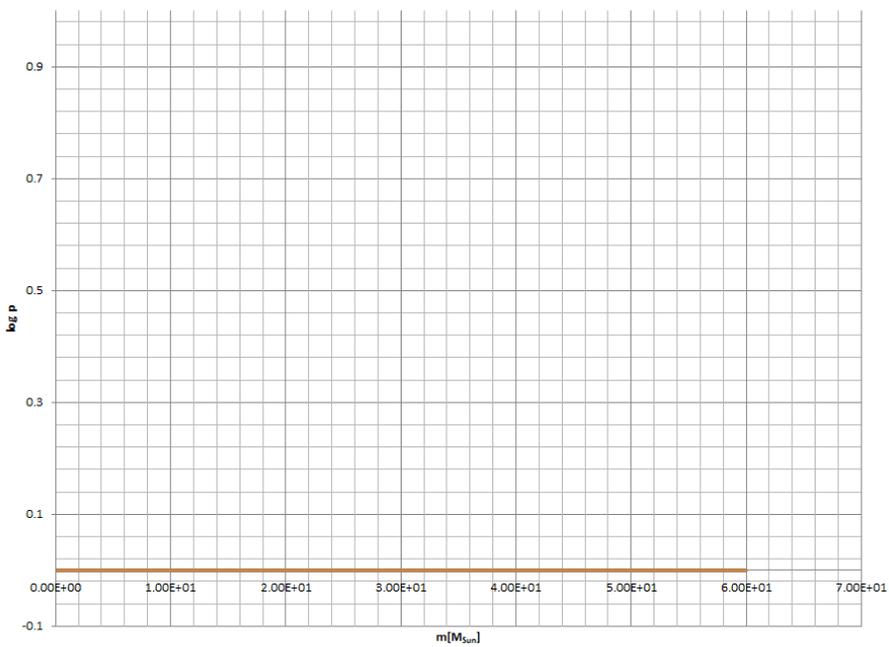
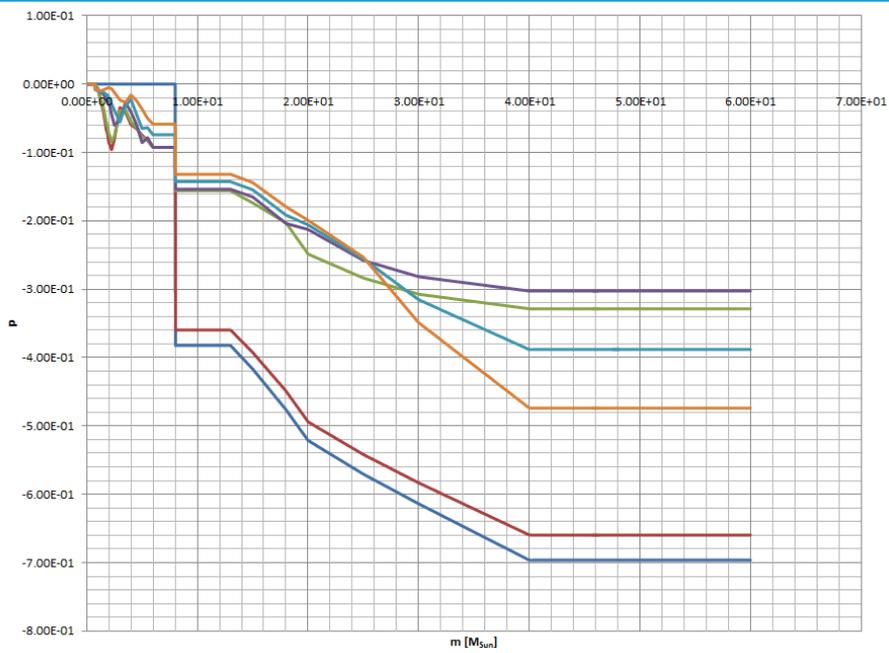
Es importante mencionar que valores positivos de p_i indican elementos generados en las estrellas y que valores negativos, indican elementos consumidos por las estrellas, para formar otros elementos químicos.



mr/m

- Z1=0
- Z2=1E-4
- Z3=1E-3
- Z4=4E-3
- Z5=8E-3
- Z6=2E-2

Figura 4.1: mr/m vs m (fracción del remanente)



${}^1\text{H}$

- Z1=0
- Z2=1E-4
- Z3=1E-3
- Z4=4E-3
- Z5=8E-3
- Z6=2E-2

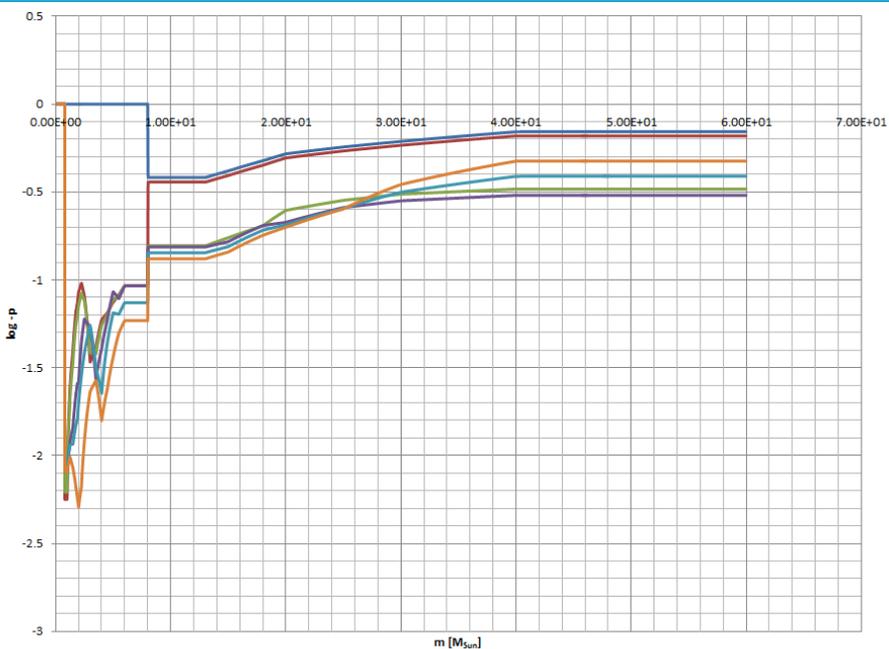
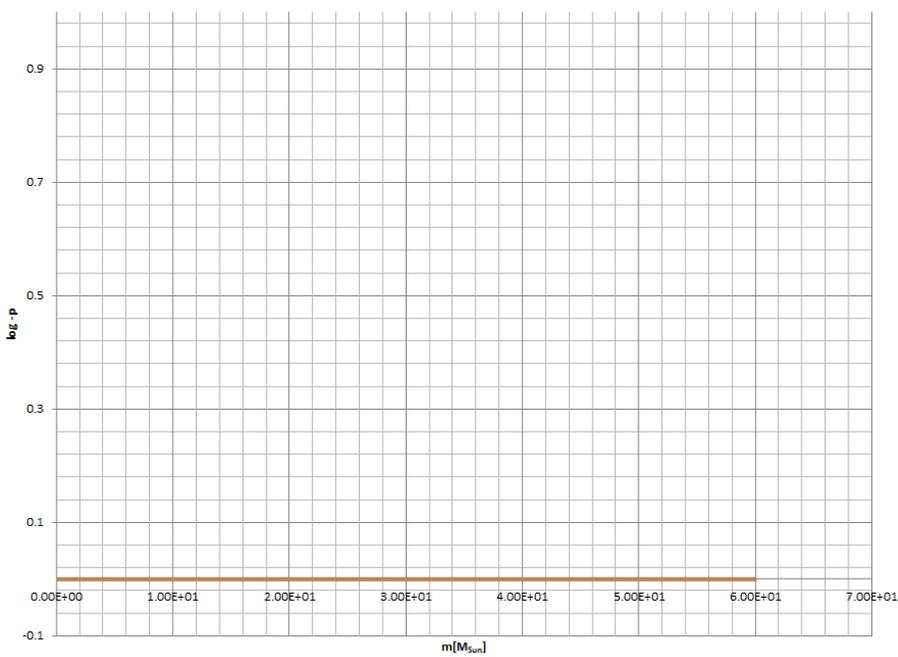
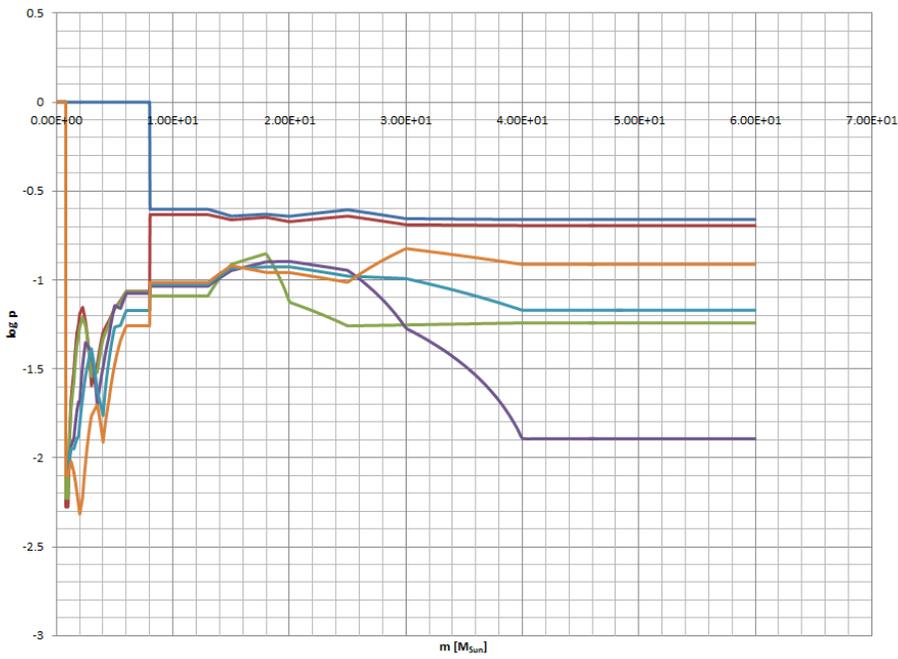
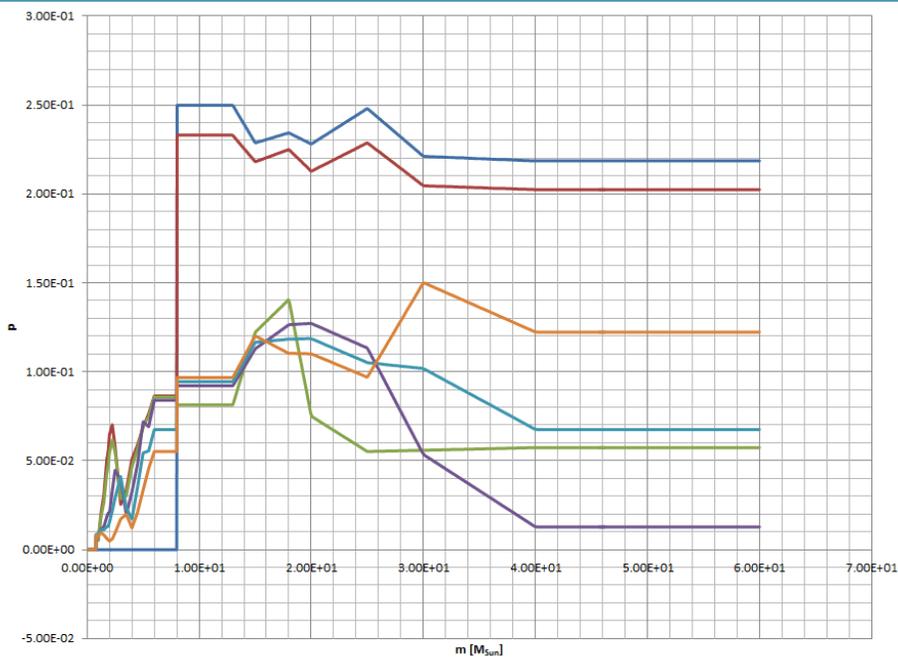


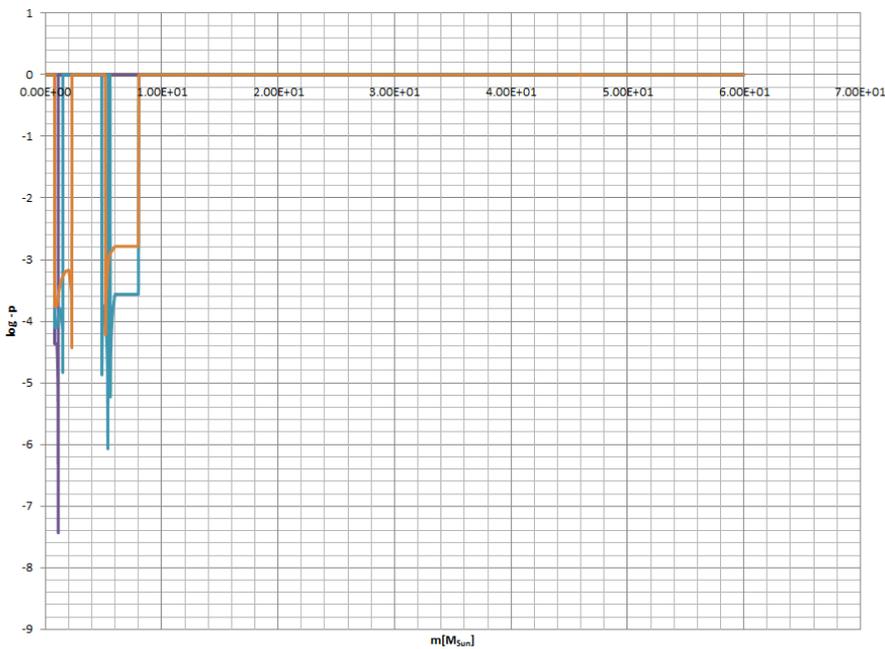
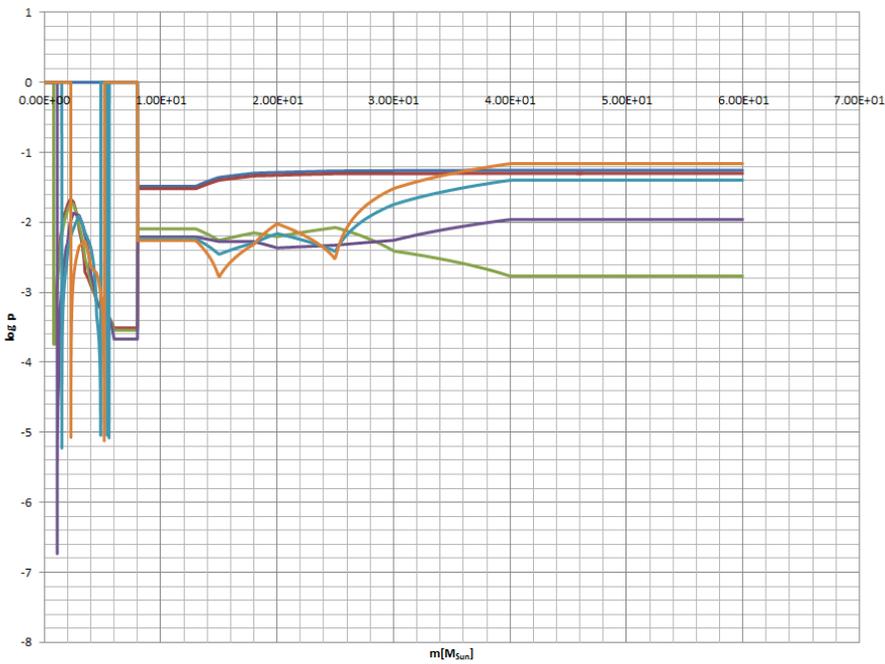
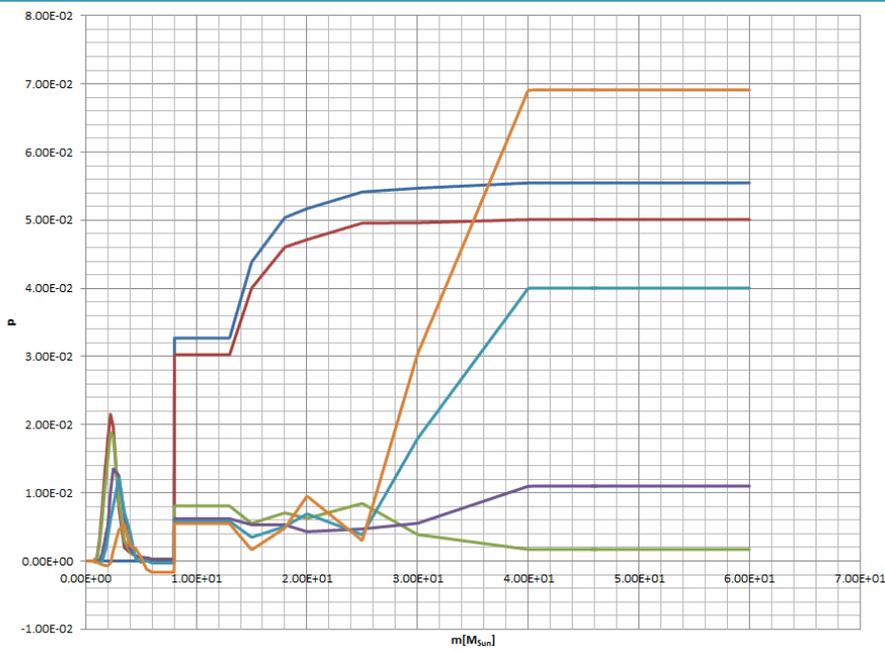
Figura 4.2: p_i vs m para ${}^1\text{H}$



${}^4\text{He}$

- Z1=0
- Z2=1E-4
- Z3=1E-3
- Z4=4E-3
- Z5=8E-3
- Z6=2E-2

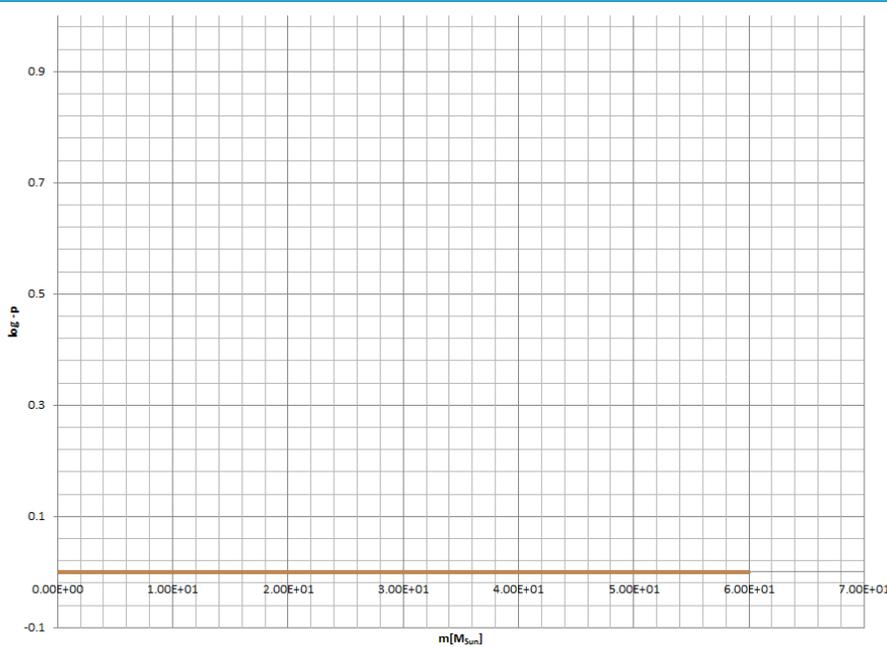
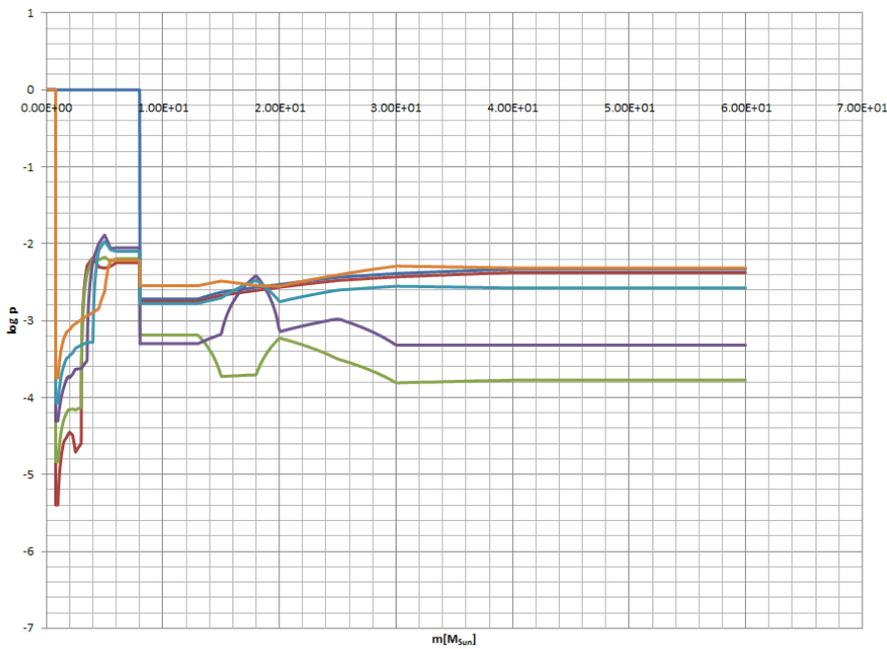
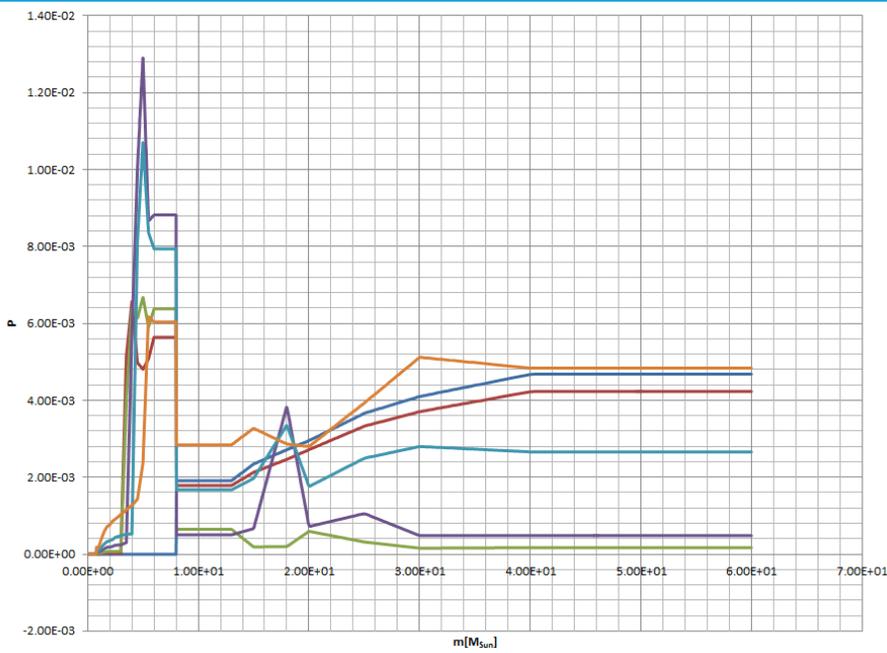
Figura 4.3: p_i vs m para ${}^4\text{He}$



^{12}C

- Z1=0
- Z2=1E-4
- Z3=1E-3
- Z4=4E-3
- Z5=8E-3
- Z6=2E-2

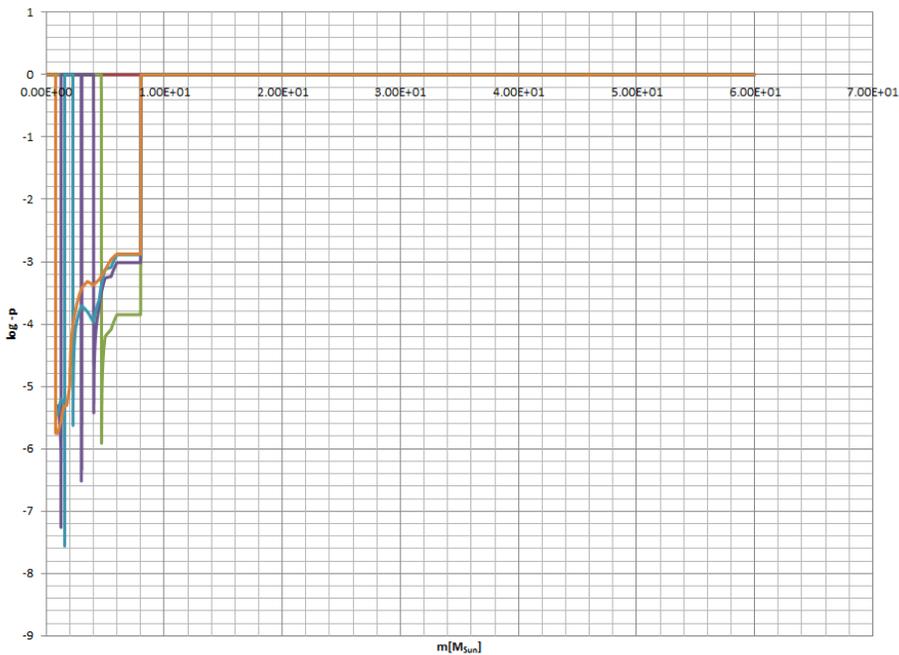
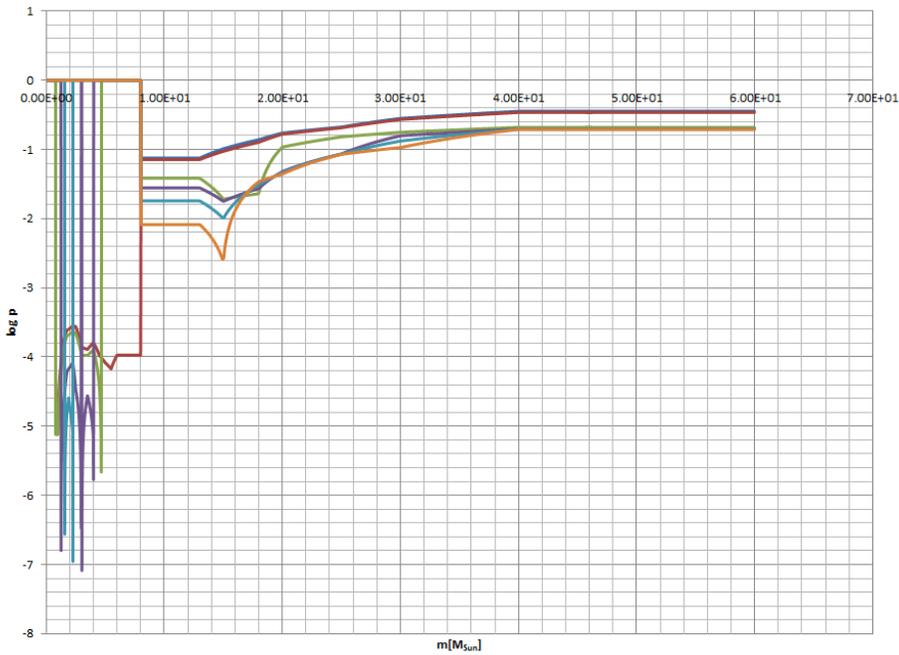
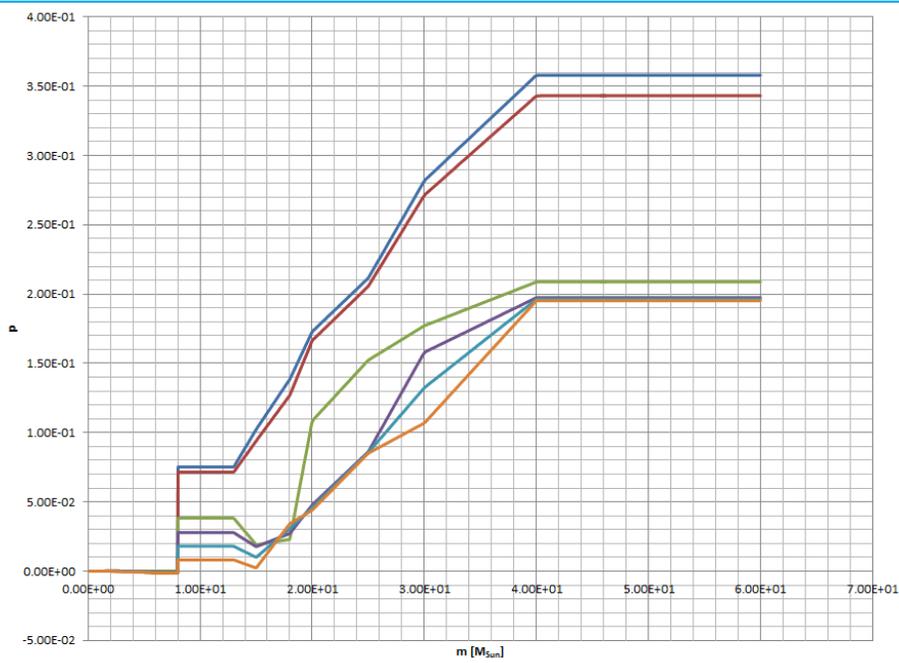
Figura 4.4: p_i vs m para ^{12}C



¹⁴N

- Z1=0
- Z2=1E-4
- Z3=1E-3
- Z4=4E-3
- Z5=8E-3
- Z6=2E-2

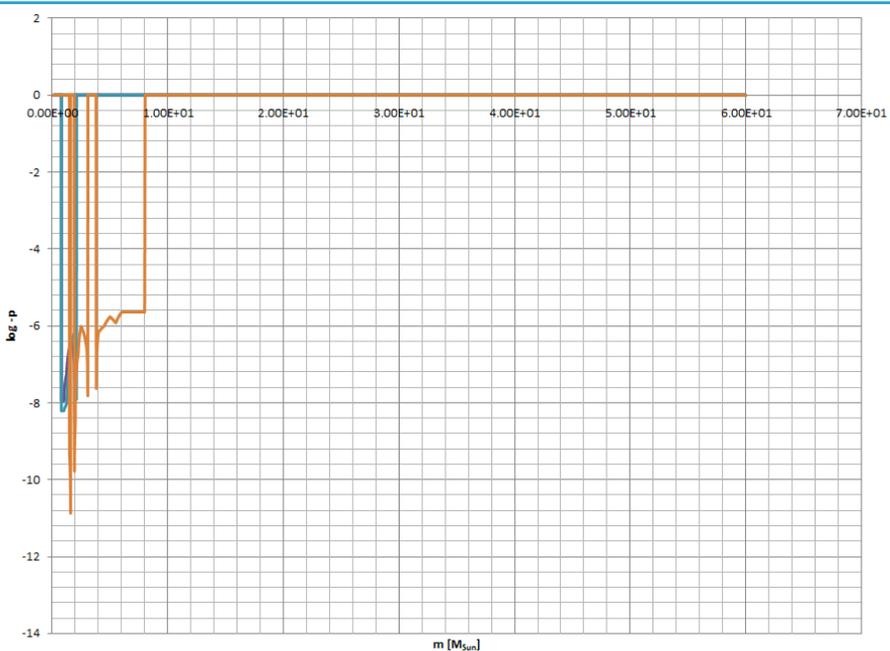
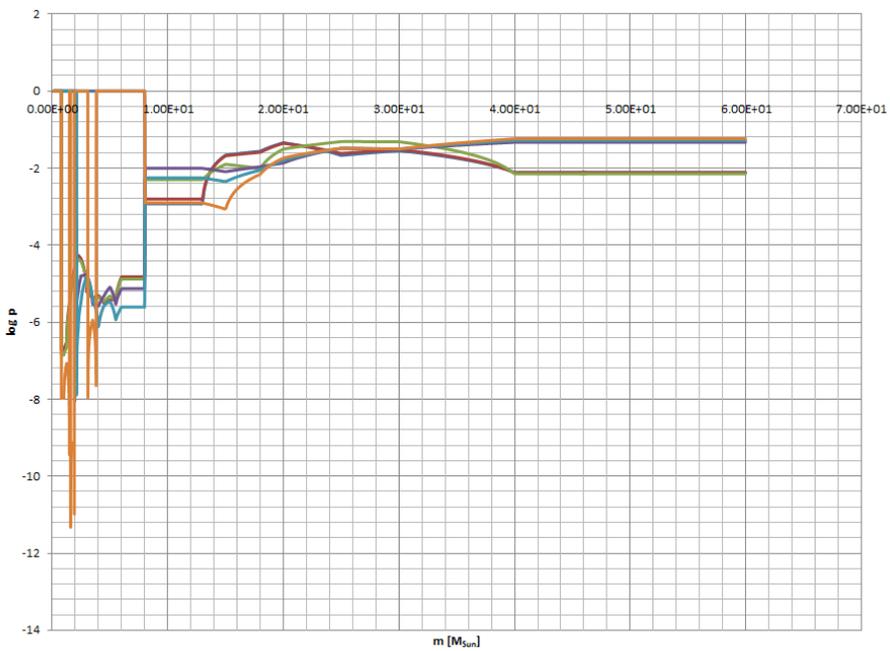
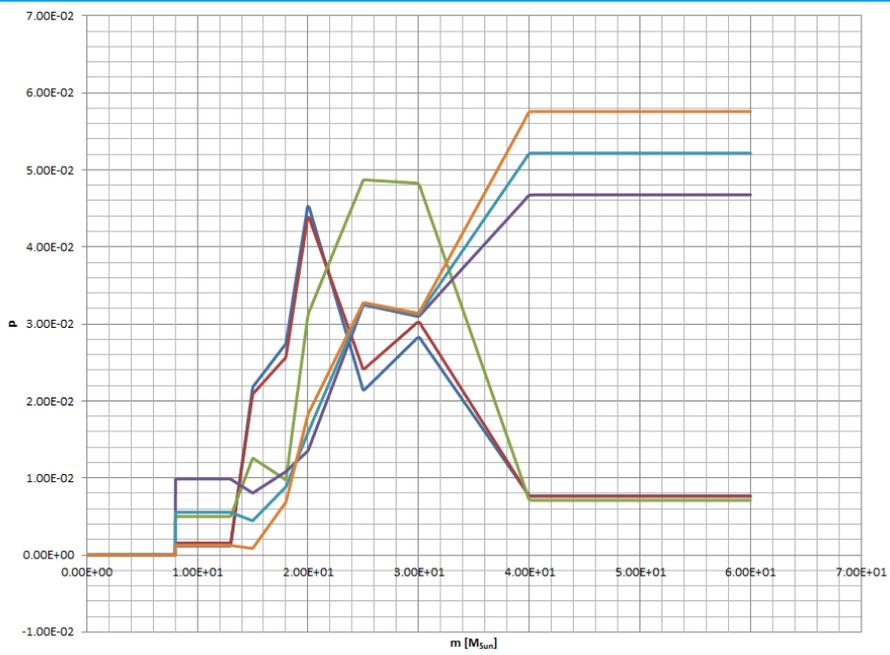
Figura 4.5: p_i vs m para ^{14}N



^{16}O

- Z1=0
- Z2=1E-4
- Z3=1E-3
- Z4=4E-3
- Z5=8E-3
- Z6=2E-2

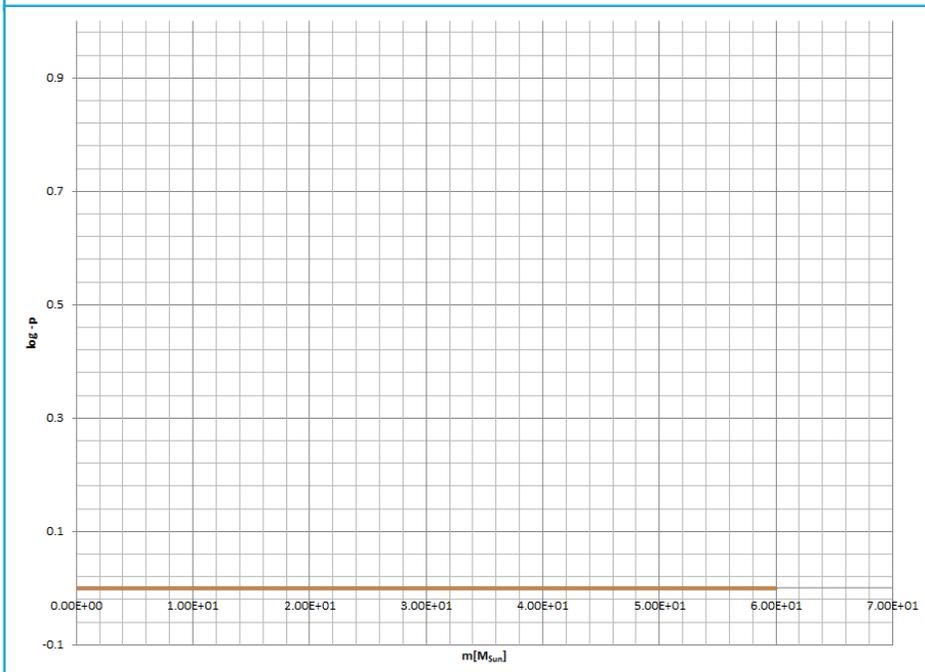
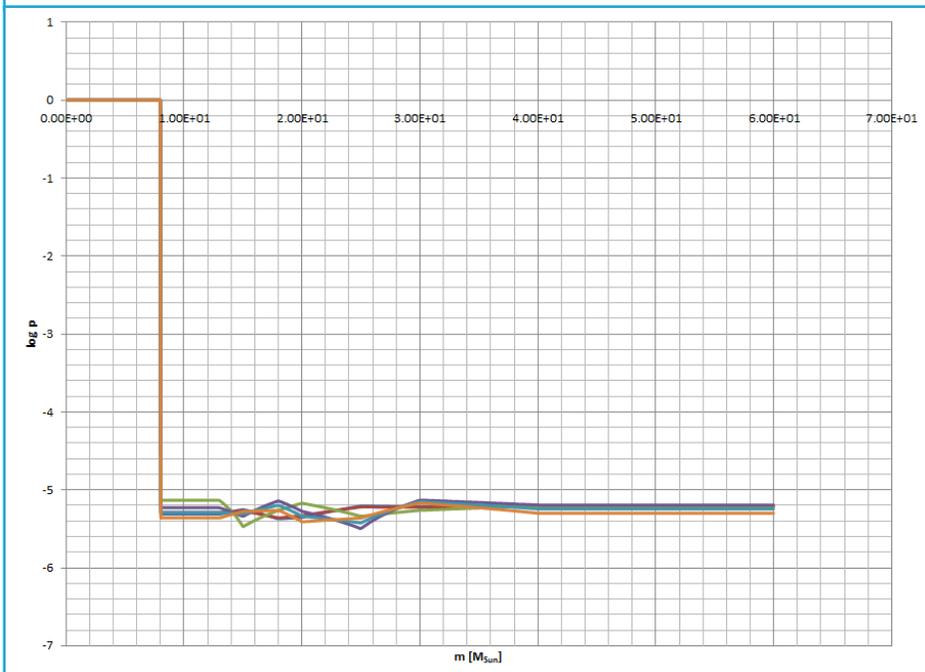
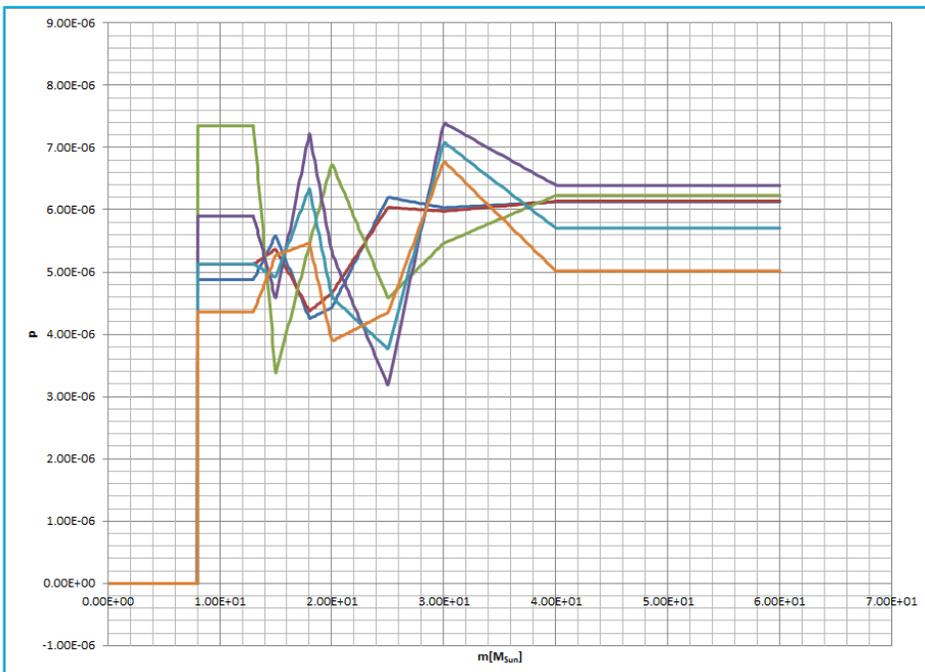
Figura 4.6: p_i vs m para ^{16}O



^{20}Ne

- $Z_1=0$
- $Z_2=1E-4$
- $Z_3=1E-3$
- $Z_4=4E-3$
- $Z_5=8E-3$
- $Z_6=2E-2$

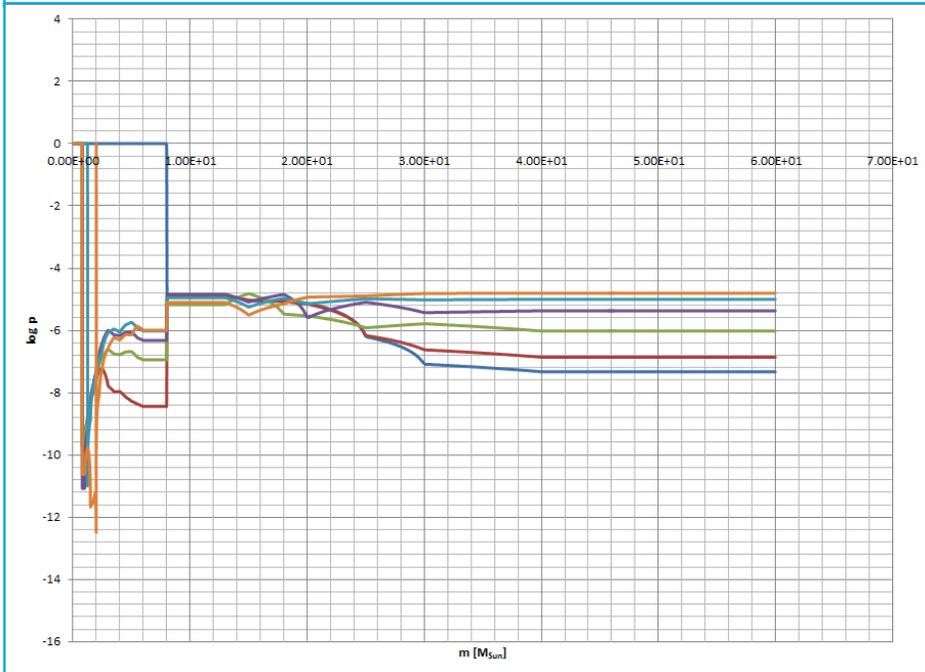
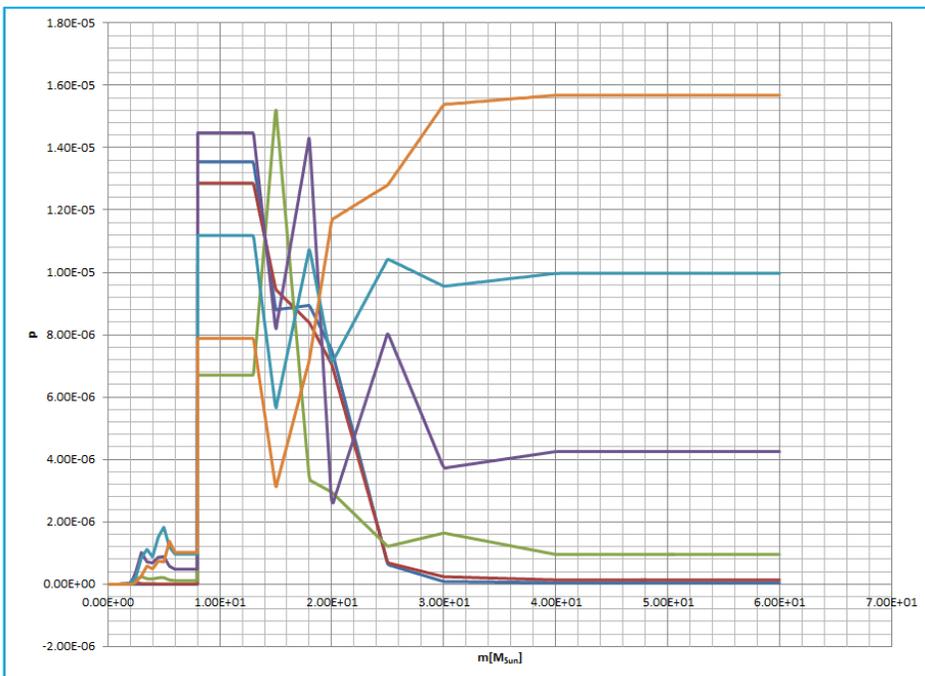
Figura 4.7: p_i vs m para ^{20}Ne



^{48}Ti

- $Z_1 = 0$
- $Z_2 = 1 \times 10^{-4}$
- $Z_3 = 1 \times 10^{-3}$
- $Z_4 = 4 \times 10^{-3}$
- $Z_5 = 8 \times 10^{-3}$
- $Z_6 = 2 \times 10^{-2}$

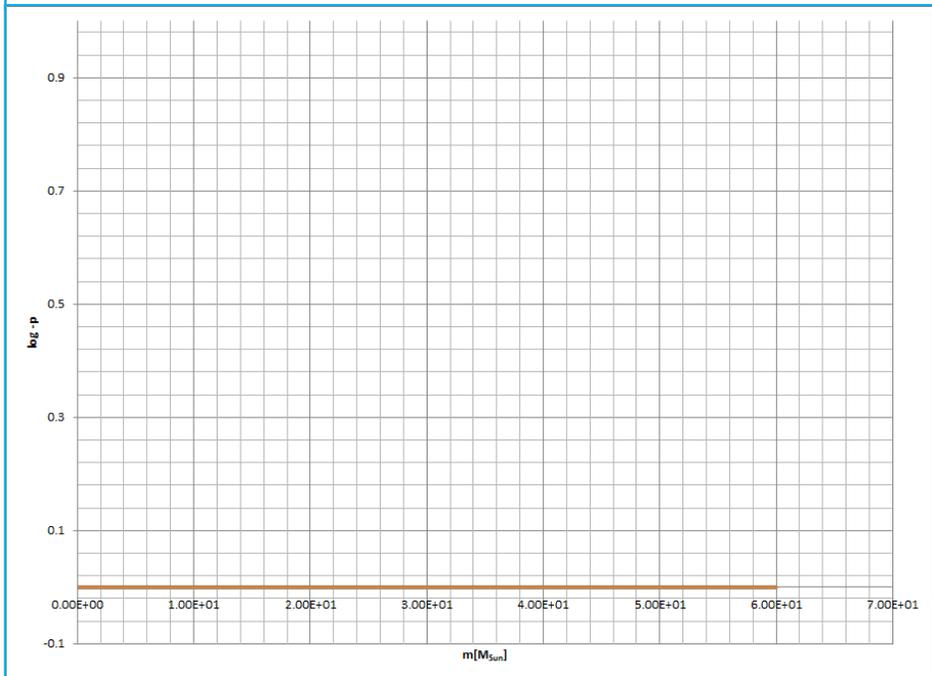
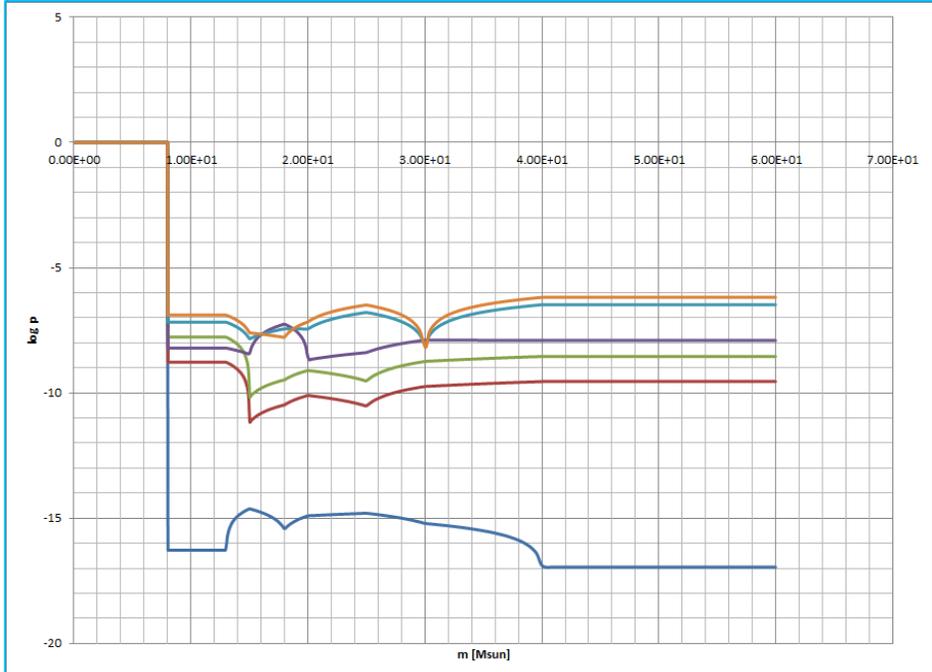
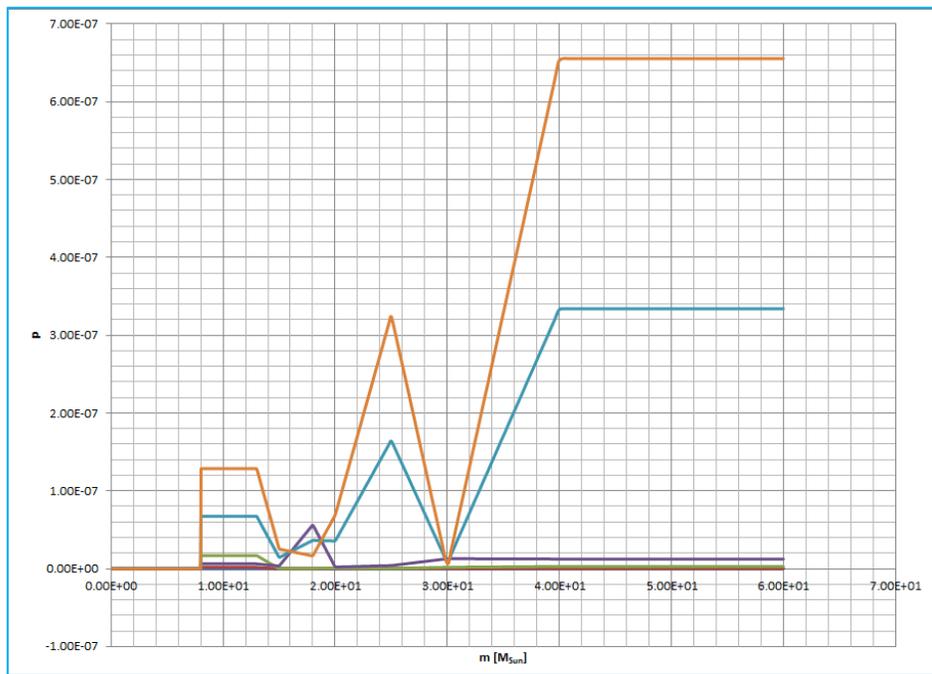
Figura 4.8: p_i vs m para ^{48}Ti



^{59}Co

- Z1=0
- Z2=1E-4
- Z3=1E-3
- Z4=4E-3
- Z5=8E-3
- Z6=2E-2

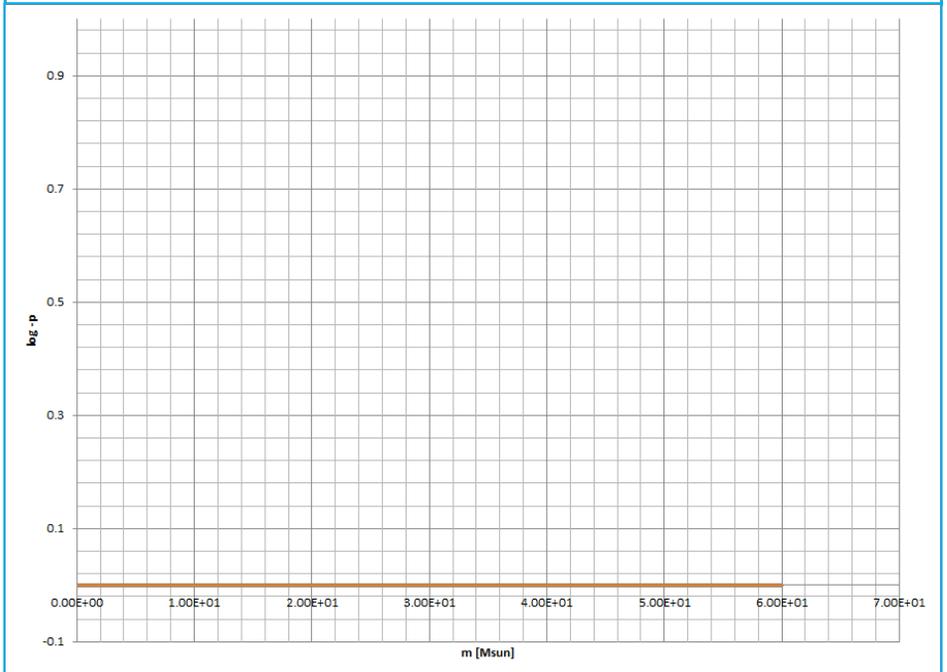
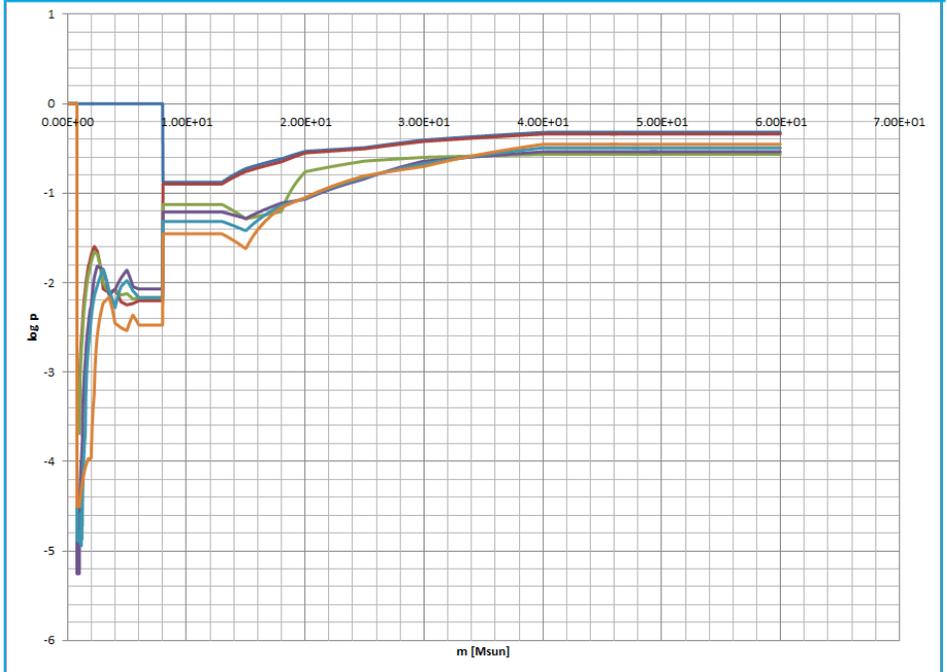
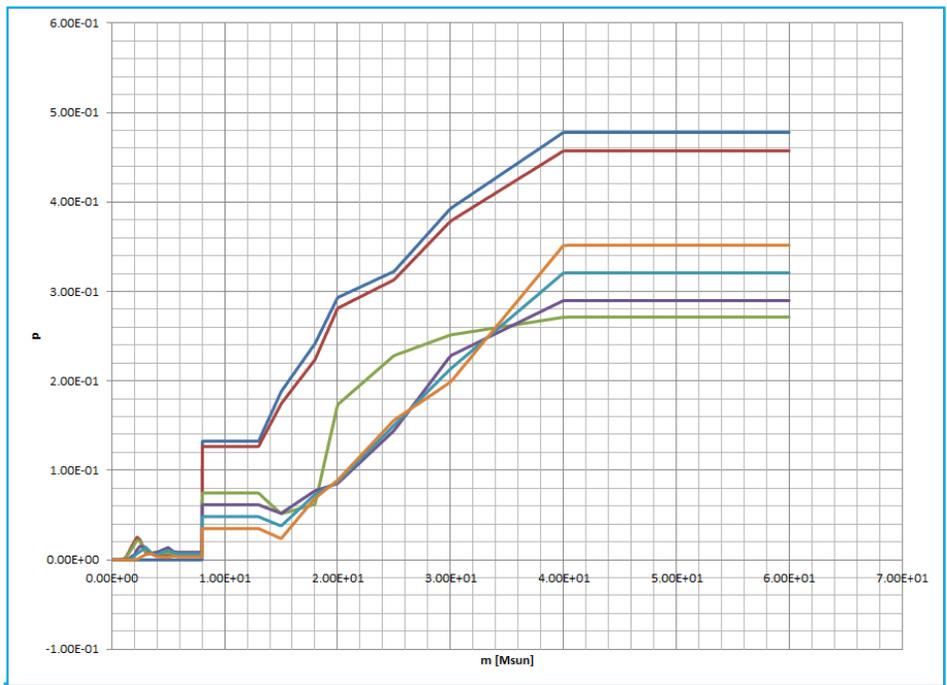
Figura 4.9: p_i vs m para ^{59}Co



^{70}Zn

- Z1=0
- Z2=1E-4
- Z3=1E-3
- Z4=4E-3
- Z5=8E-3
- Z6=2E-2

Figura 4.10: p_i vs m para ^{70}Zn



Z

- Z1=0
- Z2=1E-4
- Z3=1E-3
- Z4=4E-3
- Z5=8E-3
- Z6=2E-2

Figura 4.11: p_i vs m para Z

A continuación se analiza el comportamiento de los yields estelares respecto a la masa inicial, posteriormente se realizará el análisis respecto a la metalicidad inicial.

En la figura 4.1 podemos observar el comportamiento de m_r/m (fracción del remanente), en este caso la fracción del remanente es mayor para estrellas de baja masa (LMS) y estrellas de masa intermedia (IMS), es decir, estas estrellas eyectan al medio interestelar una menor proporción de ellas mismas cuando mueren.

En la figura 4.2 podemos observar el comportamiento de ^1H , en este caso todos los p_i son negativos, debido a que esta especie se consume en todas las estrellas para generar elementos más pesados. Con ayuda de las tres gráficas podemos notar que las estrellas masivas (MS) son las que consumen la mayor proporción de hidrógeno.

En la figura 4.3, para el ^4He , podemos observar que las estrellas que producen una mayor proporción de esta especie son las estrellas de masa intermedia (IMS) y las estrellas masivas (MS).

En la figura 4.4, para el ^{12}C , podemos observar que las estrellas que producen una mayor proporción de esta especie son las estrellas de baja masa (LMS) y las estrellas masivas (MS).

En la figura 4.5, para el ^{14}N , podemos observar que las estrellas que producen la mayor proporción de nitrógeno son las estrellas de masa intermedia (IMS) y que las estrellas masivas (MS) contribuyen con una proporción considerable.

En la figura 4.6, para el ^{16}O , podemos observar que las estrellas que producen la mayor proporción de esta especie son las estrellas masivas (MS).

En la figura 4.7, para el ^{20}Ne , podemos observar que las estrellas que producen la mayor proporción de esta especie son las estrellas masivas (MS).

En la figura 4.8, para el ^{48}Ti , podemos observar que las estrellas que producen la totalidad de esta especie son las estrellas masivas (MS).

En la figura 4.9, para el ^{59}Co podemos observar que las estrellas que producen una mayor proporción de esta especie son las estrellas masivas (MS) y que las estrellas de masa intermedia (IMS) contribuyen con una proporción considerable.

En la figura 4.10, para el ^{70}Zn , podemos observar que las estrellas que producen la totalidad de esta especie son las estrellas masivas (MS).

Y por último, en la figura 4.11 podemos observar que el comportamiento de Z es muy parecido al comportamiento del ^{16}O , debido a que Z es la suma de todos los elementos más pesados que el helio y el ^{16}O es el elemento pesado más abundante en el Universo (ver tabla 2.4). Por lo tanto, para Z se puede observar que las estrellas que producen la mayor proporción de metales son las estrellas masivas (MS), tomando en cuenta también que las estrellas de baja masa (LMS) y masa intermedia (IMS) tienen una ligera contribución debida a los otros elementos pesados.

Habiendo terminado el análisis del comportamiento de los yields estelares respecto a la masa inicial, a continuación se comienza el análisis respecto a la metalicidad inicial, enfocado a los elementos representativos, excepto el ^1H que siempre se consume.

Para todas las especies y $Z_i=0$, los valores de p_i son mayores que aquellos para las 5 metalicidades restantes. Esto se debe a que los modelos de evolución química predicen que las estrellas con $Z=0$ fueron muy eficientes en producir elementos químicos debido a las elevadas velocidades de rotación estelar, unas 4 veces mayor que la del Sol¹⁹. Es importante mencionar que hasta el día de hoy no se tienen del todo claro los mecanismos mediante los cuales ocurrieron estos eventos.

¹⁹ Velocidad de rotación del Sol= 7.189E3 km/h.

Para todos los elementos, $Z_2=1E-4$ y estrellas masivas (MS) el comportamiento general es semejante al de $Z_1=0$, ya que a estas bajas metalicidades domina la rotación estelar (Hirshi 2007). En cambio para las estrellas de baja masa (LMS) y masa intermedia (IMS) la dependencia con Z_i es diferente a la mostrada por las MS y diversa en cada especie.

Para ${}^4\text{He}$ y ${}^{12}\text{C}$, para estrellas de baja masa (LMS) y estrellas de masa intermedia (IMS), los yields estelares disminuyen al aumentar Z_i , ya que a altas metalicidades, los vientos estelares son mayores y las estrellas conservan menos masa para producir estos elementos. Para las estrellas masivas (MS), los yields estelares aumentan al incrementar Z_i , ya que los vientos estelares intensos desnudan a las estrellas del ${}^4\text{He}$ y el ${}^{12}\text{C}$ producido en el núcleo estelar y transportado hacia la superficie de las estrellas.

Para ${}^{16}\text{O}$ y ${}^{48}\text{Ti}$, especies producidas principalmente en estrellas masivas (MS), los yields estelares se comportan de manera opuesta a los del ${}^4\text{He}$ y ${}^{12}\text{C}$, debido a que los vientos potentes reducen la cantidad de ${}^{12}\text{C}$ en la estrella, siendo este el reactivo para la producción de ${}^{16}\text{O}$ y ${}^{48}\text{Ti}$.

El ${}^{20}\text{Ne}$, depende también del ${}^{12}\text{C}$ como reactivo, su comportamiento es similar al del ${}^{16}\text{O}$ y el ${}^{48}\text{Ti}$ en Z_i , para la mayoría de las estrellas masivas ($8 M_{\text{Sun}} < m < 35 M_{\text{Sun}}$). En este caso es importante recordar que el ${}^{20}\text{Ne}$ y el ${}^{48}\text{Ti}$ no forman parte de los elementos que fueron mejorados al añadir yields que sí consideran vientos estelares (ver sección 2.1.1). Por esta razón sus comportamientos con Z_i no son tan marcados como el de ${}^{16}\text{O}$, elemento que sí fue contemplado en las mejoras.

Para el ${}^{14}\text{N}$ y ${}^{59}\text{Co}$, los yields estelares aumentan con Z_i debido al ciclo CNO (ver sección 1.3), donde el ${}^{12}\text{C}$ y el ${}^{16}\text{O}$ actúan como catalizadores. Por lo tanto las estrellas ricas en metales (${}^{12}\text{C}$ y ${}^{16}\text{O}$, incluidos) son más eficientes en producir ${}^{14}\text{N}$ y ${}^{59}\text{Co}$. Al final de la cadena CNO se generan 2 subproductos: ${}^{14}\text{N}$, en un 98% y ${}^{18}\text{O}$, en un 2%, aproximadamente. A partir del ${}^{18}\text{O}$ se produce otra cadena de

reacciones que generan neutrones libres, los cuales son absorbidos por núcleos de ^{56}Fe , para producir los elementos s, siendo el ^{59}Co uno de ellos.

Finalmente, para el ^{70}Zn se puede observar que la producción de esta especie en estrellas masivas (MS) aumenta con Z_i , la dependencia de este comportamiento con la metalicidad no se tiene del todo claro en la literatura, en términos energéticos sabemos que los yields estelares para el zinc aumentan conforme aumenta la energía de la supernova (etapa final de vida de MS), parámetro regido por un fenómeno conocido como colapso del núcleo.

4.2 Yields de la población estelar en función de la masa estelar superior formada.

Con el propósito de cuantificar las aportaciones de las poblaciones estelares a las abundancias químicas del medio interestelar, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1.- Se realizó la extrapolación lineal de la masa inicial hasta $100M_{\text{Sun}}$ para los yields estelares de las 106 especies químicas, esto para abarcar un rango más grande de masa estelar.

2.-Se calculó la IMF y la correspondiente constante de normalización para cada valor de m_{sup} (10, 20, 30, 40, 60, 80 y $100 M_{\text{Sun}}$). Considerando que para $Z_i=0$ las constantes de normalización se calculan solo de $8M_{\text{Sun}}$ a la m_{sup} , debido a que no se formaron estrellas con masa inicial menor a $8 M_{\text{Sun}}$.

La ecuación 3.2, se utilizó para el cálculo de las constantes de normalización, mientras que para el cálculo de la IMF se utilizó la ecuación 3.1 (ver sección 3.2). Se obtuvieron 14 IMFs para 7 valores distintos de la m_{sup} y 2 metalicidades iniciales por m_{sup} (Z_1 de 8 a m_{sup} y de Z_2 a Z_6 de 0.1 a m_{sup}).

3.- Se escribió un código fuente en el lenguaje de programación Python que calcula los yields netos (Y_i) y R (ver sección 2.3) utilizando las IMFs calculadas anteriormente.

Un código fuente es un conjunto de líneas de texto que se traduce como instrucciones que debe seguir la computadora para ejecutar dicho programa, en nuestro caso las líneas de código fueron diseñadas para calcular las integrales definidas de los Y_i y los R_s . En términos generales lo que hace el código es leer la matriz como archivo de texto y poner etiquetas a cada una de las columnas (le asigna un “nombre” a cada una de ellas). El código fue creado con el objetivo de que los parámetros utilizados en el cálculo se obtuvieran de manera interactiva con el usuario, es decir, el código genera preguntas que éste debe contestar en la interfaz. Las entradas que debe introducir son:

- La m_{sup} , al elegir este valor se asigna el correspondiente valor de la IMF.
- El p_i correspondiente, para las 106 especies químicas

Todo lo anterior se realiza para cada una de las 6 metalicidades iniciales.

El método numérico con el que se realizó el cálculo de las integrales para los Y_i y los R_s , es la regla del punto medio para integrales definidas de las fórmulas abiertas de Newton-Cotes.

Al final se genera un archivo de salida con los datos generados, se obtiene el valor de los Y_i para cada una de las 106 especies y R para cada m_{sup} en cada valor de Z_i .

```

1 |#Programa_bien
2
3 import re
4 import sys
5 import numpy as np
6
7 entrada = 'Z6_final.txt'
8 entrada1=raw_input('Nombre de la IMF: ')
9 entrada2=raw_input('Nombre del p(i): ')
10 entrada3=raw_input('Cual es la Msup: ')
11 salida = 'salidaZ6MSUP100.txt'
12
13 archivoe = open(entrada,'r')
14 lines = archivoe.readlines()
15 archivoe.close()
16
17 archivos = open(salida,'w')
18
19 etiquetas=re.split('[ \r\n\t]+',lines[0])
20
21 n=etiquetas.index(entrada1)
22 n2=etiquetas.index(entrada2)
23
24 P=[]
25 Q=[]
26 R=[]
27 S=[]

```

```

28
29 for e in range(n2,len(etiquetas)-1):
30
31     m=[]
32     mr=[]
33     IMF=[]
34     pi=[]
35
36     Msup=float(entrada3)
37
38     i=0
39     for line in lines[1:]:
40         elementos=re.split('[ \r\n\t]+',line)
41         IMF.append(float(elementos[n]))
42         pi.append(float(elementos[e]))
43         m.append(float(elementos[0]))
44         mr.append(float(elementos[2]))
45         i=i+1
46
47         # print IMF[-1],pi[-1],m[-1], mr[-1],Msup #e1 [-1]
48         # print i
49
50     #Integral Yields
51
52     p=0 #inicializacion para los acumulados
53     q=0
54     r=0
55     p1=0
56     q1=0
57     r1=0
58     pz=0
59     qz=0
60     rz=0

```

```

61
62     for j in range(1,len(m)):
63         if m[j]<3:
64             x=m[j]-m[j-1] #dm
65             y=((m[j-1]*pi[j-1]*IMF[j-1])+(m[j]*pi[j]*IMF[j]))/2 #Integral Yields LMS
66             z=((m[j-1]*(1-mr[j-1])*IMF[j-1])+(m[j]*(1-mr[j])*IMF[j]))/2 #Integral R LMS
67             p+=x*y #p=(x*y)+1
68             pz+=x*z
69             p1=p1+1
70
71
72         elif m[j]<8:
73             x=m[j]-m[j-1] #dm
74             y=((m[j-1]*pi[j-1]*IMF[j-1])+(m[j]*pi[j]*IMF[j]))/2 #Integral Yields IMS
75             z=((m[j-1]*(1-mr[j-1])*IMF[j-1])+(m[j]*(1-mr[j])*IMF[j]))/2 #Integral R IMS
76             q+=x*y #q=(x*y)+1
77             qz+=x*z
78             q1=q1+1
79
80         elif m[j]<Msup:
81             x=m[j]-m[j-1] #dm
82             y=((m[j-1]*pi[j-1]*IMF[j-1])+(m[j]*pi[j]*IMF[j]))/2 #Integral Yields MS
83             z=((m[j-1]*(1-mr[j-1])*IMF[j-1])+(m[j]*(1-mr[j])*IMF[j]))/2 #Integral R MS
84             r+=x*y #r=(x*y)+1
85             rz+=x*z
86             r1=r1+1
87         else:
88             break

```

```

89     s=0
90     s1=0
91     sz=0
92     for j in range(1,len(m)): #INTEGRAL COMPLETA
93         if m[j]<Msup:
94             x=m[j]-m[j-1] #dm
95             y=((m[j-1]*pi[j-1]*IMF[j-1])+(m[j]*pi[j]*IMF[j]))/2 #Integral Yields completa
96             z=((m[j-1]*(1-mr[j-1])*IMF[j-1])+(m[j]*(1-mr[j])*IMF[j]))/2 #Integral R completa
97             s+=x*y #s=(x*y)+1
98             sz+=x*z
99             s1=s1+1
100        else:
101            break
102
103        P.append(p)
104        Q.append(q)
105        R.append(r)
106        S.append(s)
107
108    for p in P:
109        archivos.write(str(p) + '\t')
110    archivos.write('\n')
111
112    for q in Q:
113        archivos.write(str(q) + '\t')
114    archivos.write('\n')
115
116    for r in R:
117        archivos.write(str(r) + '\t')
118    archivos.write('\n')
119
120    for s in S:
121        archivos.write(str(s) + '\t')
122
123

```

Figura 4.12: Código fuente en el lenguaje de programación Python para el cálculo de Yi y R.

4.- Se obtuvieron los resultados de los Y_i para las 106 especies químicas y los R para 7 valores de m_{sup} , y 6 valores de Z_i para LMS, IMS y MS.

Los resultados para R y los Y_i de los elementos representativos se encuentran en el apéndice A. En primer lugar se muestran los resultados para R , y posteriormente los Y_i de los elementos representativos en orden creciente de número atómico. Cabe aclarar que algunos valores de Z_1 tuvieron que ser divididos entre 10 para una mejor apreciación y comparación con los demás valores de metalicidad (se aclara en los pies de figura correspondientes).

De la tabla A.1 a la tabla A.38 podemos observar los resultados arrojados por el programa, en cada una de ellas se muestran los yields netos (Y_i) de cada especie en particular y R para las 6 Z_i utilizadas y para cada valor de m_{sup} , sus graficas correspondientes se pueden observar de la figura A.1 a la figura A.38.

Tanto las tablas como las gráficas de los yields estelares nos dan la aportación de los 3 tipos de estrellas consideradas en este trabajo al enriquecimiento químico del medio interestelar.

En la figura 2.1 (ver sección 2.2), correspondiente a la IMF, podemos observar que en un brote de formación estelar se produce mucha mayor cantidad de LMS E IMS que de MS. Debido a que Los Y_i están en función de la IMF y de los $p_i(m)$ (ver ecuación 3.3), para interpretar los yields netos obtenidos, se debe considerar el número de estrellas formadas según la masa inicial (IMF(m)) y la eficiencia estelar de formar el elemento químico i ($p_i(m)$).

Ya que las poblaciones estelares consideradas son monometálicas (todas las estrellas presentan la misma metalicidad inicial, Z_i), el comportamiento con Z_i de los yields de las poblaciones (Y_j) será similar al comportamiento con Z_i de los yields estelares (p_j). Ver sección 4.1 para un análisis detallado de los p_j (Z_i). Entonces, el siguiente análisis de los Y_j se basará sólo en la masa superior de la población estelar, m_{sup} .

Para cada elemento químico representativo se obtuvieron 4 tablas y sus 4 gráficas, correspondientes a los 3 tipos de poblaciones estelares consideradas en esta tesis y la suma de dichas poblaciones:

- a) Y_i para LMS,
- b) Y_i para IMS,
- c) Y_i para MS,
- d) Y_i para la población estelar completa, representada como ALL.

Los resultados se muestran en el apéndice A.

Para todos los elementos, los yields de LMS y IMS casi no dependen de m_{sup} , debido a que la IMF predice una cantidad enorme de estos tipos de estrellas en relación al número de estrellas masivas (menor por varios órdenes de magnitud). Por lo tanto, estos yields son casi invariantes al aumento de la masa superior de estrellas masivas.

Para los elementos producidos principalmente por las estrellas masivas (^{16}O , ^{20}Ne , ^{48}Ti , ^{59}Co , ^{70}Zn) los Y_i de MS aumentan considerablemente con el valor de m_{sup} , mientras los Y_i de IMS y LMS son bajos.

Para los elementos producidos por MS, IMS y LMS (^4He , ^{12}C y ^{14}N) los Y_i de MS aumentan con el valor de m_{sup} , mientras los Y_i de IMS y LMS son del orden o mayor que los Y_i de MS.

Los Y_i de la población estelar completa, LMS+IMS+MS, siguen el comportamiento con m_{sup} semejante a los Y_i de MS, pero no tan marcado, debido a la contribución de las IMS y LMS.

5.- A partir de los resultados obtenidos de los yields netos (Y_i), se analiza la contribución porcentual de los 3 diferentes tipos de poblaciones estelares (LMS, IMS y MS) para cuantificar cuál de estos tipos es el más eficiente en producir determinada especie química y, por ende, enriquecer químicamente el medio interestelar.

A continuación se muestra el análisis correspondiente para todos los elementos químicos representativos, excepto el ^1H , ya que este se consume en todas las estrellas. Tampoco se analiza R, ya que representa la fracción de gas que es eyectada al medio interestelar por las estrellas, gas sin diferenciación alguna por elemento químico.

Este análisis solo se hace para $m_{\text{sup}} = 60 M_{\text{Sun}}$ porque el comportamiento de los yields netos se mantiene constante para masas mayores de $60M_{\text{Sun}}$, debido a la extrapolación realizada.

Cabe mencionar que en todas las tablas (de la 4.13 a la 4.19) y las figuras (de la 4.1 a la 4.8) se excluye $Z_1=0$ debido a que a esa metalicidad la contribución de las estrellas masivas corresponden al 100 %, porque únicamente se formaron este tipo de estrellas.

^4He :

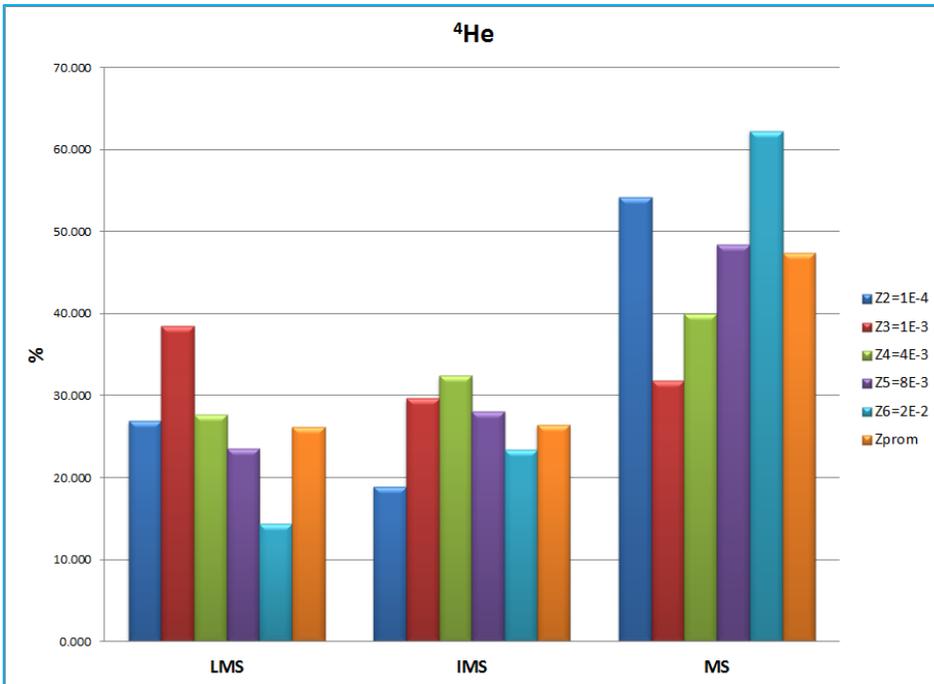


Figura 4.13: Contribución porcentual de ^4He por población estelar para las 6 Z_i más la Z_i promedio (sin considerar $Z_i=0$)

%	LMS	IMS	MS
Z2	26.87	18.94	54.20
Z3	38.50	29.64	31.86
Z4	27.63	32.38	39.98
Z5	23.54	28.06	48.41
Z6	14.40	23.40	62.21
Zprom	26.19	26.48	47.33

Tabla 4.1: Contribución porcentual de ^4He por población estelar para las 6 Z_i más la Z_i promedio (sin considerar $Z_i=0$)

Como se puede observar en la figura 4.13 y en la tabla 4.1, en promedio de metalicidades (Z_{prom}), la población que más enriquece al medio interestelar con ^4He es la de las MS con el 47.3%, en segundo lugar las IMS con el 26.5% y por último las LMS con el 26.2% .

Para todas las metalicidades se mantiene la mayor contribución por parte de las MS, excepto para la Z_3 en la cual la mayor contribución es de las LMS, debido a que a bajas metalicidades los vientos estelares son débiles y la estrella conserva mucha masa para producir ^4He .

Es de hacer notar que la mayor contribución de todas es de las MS en Z_6 , debido a que los vientos intensos eyectan mucho ^4He .

^{12}C :

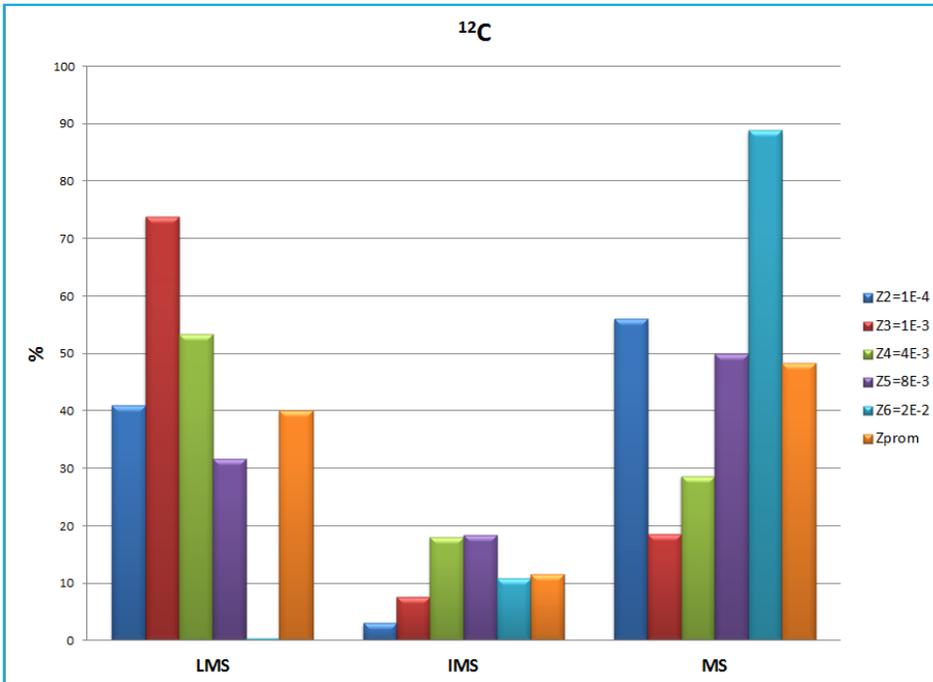


Figura 4.14: Contribución porcentual de ^{12}C , Z_i como en figura 4.13

%	LMS	IMS	MS
Z2	40.89	3.08	56.03
Z3	73.80	7.68	18.52
Z4	53.40	17.98	28.62
Z5	31.64	18.39	49.98
Z6	0.39	10.78	88.83
Zprom	40.02	11.58	48.40

Tabla 4.2: Contribución porcentual de ^{12}C , Z_i como en tabla 4.1

Como se puede observar en la figura 4.14 y en la tabla 4.2, en Zprom, las MS contribuyen al enriquecimiento de ^{12}C con 48.4%, las LMS con 40.0% y las IMS con 11.6%.

Para todas las metalicidades se mantiene la mayor contribución por parte de las MS, excepto para la Z_3 y Z_4 en las cuales la mayor aportación es de las LMS, debido a que a bajas metalicidades los vientos estelares son débiles y la estrella conserva mucha masa para producir ^{12}C . Es de hacer notar que la mayor contribución de todas es de las MS con Z_6 debido a que los vientos intensos eyectan el ^{12}C antes de ser utilizado en la nucleosíntesis del ^{16}O .

^{14}N :

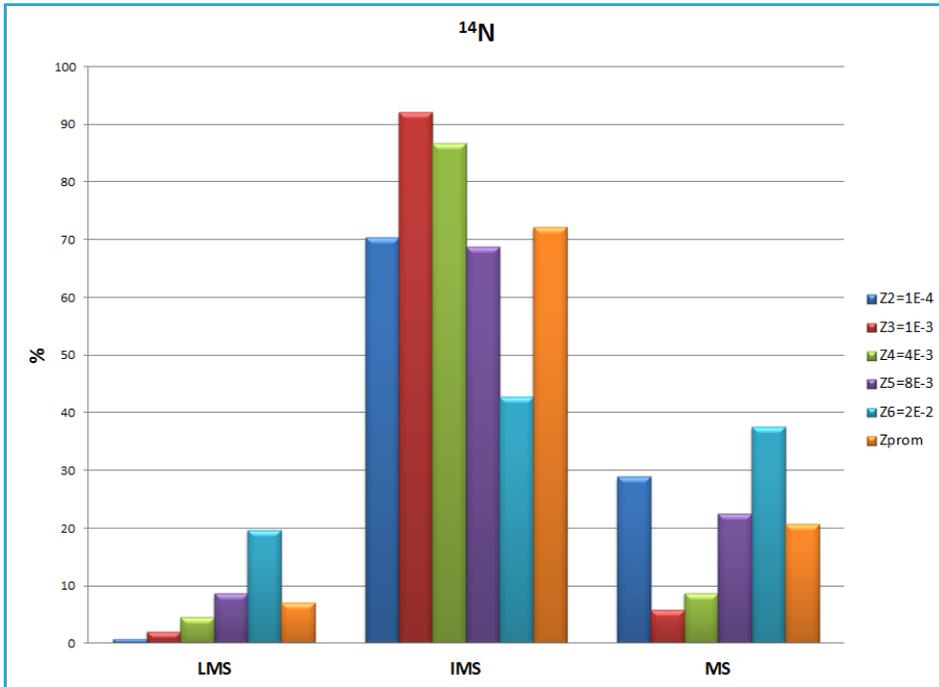


Figura 4.15: Contribución porcentual de ^{14}N , Z_i como en figura 4.13

%	LMS	IMS	MS
Z2	0.74	70.37	28.89
Z3	2.06	92.06	5.88
Z4	4.54	86.69	8.77
Z5	8.68	68.74	22.58
Z6	19.66	42.73	37.61
Zprom	7.14	72.12	20.75

Tabla 4.3: Contribución porcentual de ^{14}N , Z_i como en tabla 4.1

Como se puede observar en la figura 4.15 y en la tabla 4.3, en Zprom, las IMS contribuyen al enriquecimiento de ^{14}N con 72.1%, las MS con 20.8% y las LMS con sólo 7.1%.

Para todas las metalicidades se mantiene la mayor contribución por parte de las IMS. Resulta interesante que para Z_6 y MS la contribución es importante, debido a que las estrellas masivas metálicas son muy eficientes en producir ^{14}N gracias al ciclo CNO (ver sección 4.1).

^{16}O :

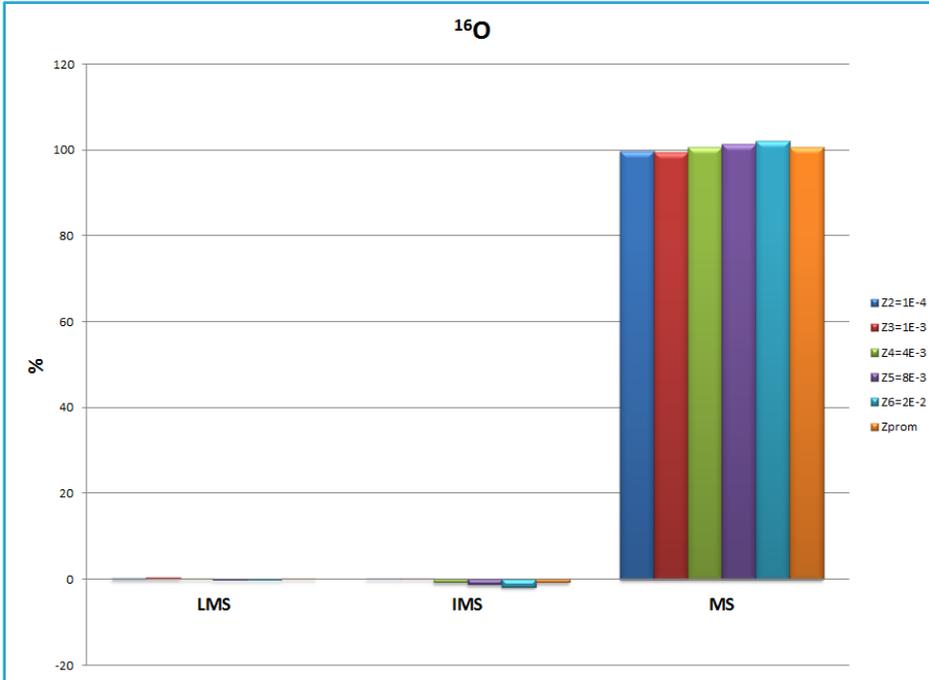


Figura 4.16: Contribución porcentual de ^{16}O , Z_i como en figura 4.13

%	LMS	IMS	MS
Z2	0.32	0.10	99.58
Z3	0.46	0.00	99.54
Z4	0.12	-0.71	100.59
Z5	-0.09	-1.23	101.31
Z6	-0.26	-1.85	102.11
Zprom	0.11	-0.74	100.63

Tabla 4.4: Contribución porcentual de ^{16}O , Z_i como en tabla 4.1

Como se puede observar en la figura 4.16 y en la tabla 4.4, en Zprom, la población que enriquece de manera dominante al medio interestelar con ^{16}O es la de las MS con el “100.6%”. Este valor es la contribución porcentual considerando el consumo de ^{16}O en las IMS con -0.7%, mientras que las LMS tienen una ligera contribución del 0.1%.

El ^{16}O es producido únicamente por las MS debido a que el núcleo de esas estrellas está a altas densidades y temperaturas, las cuales son óptimas para hacer nucleosíntesis de elementos más pesados.

^{20}Ne :

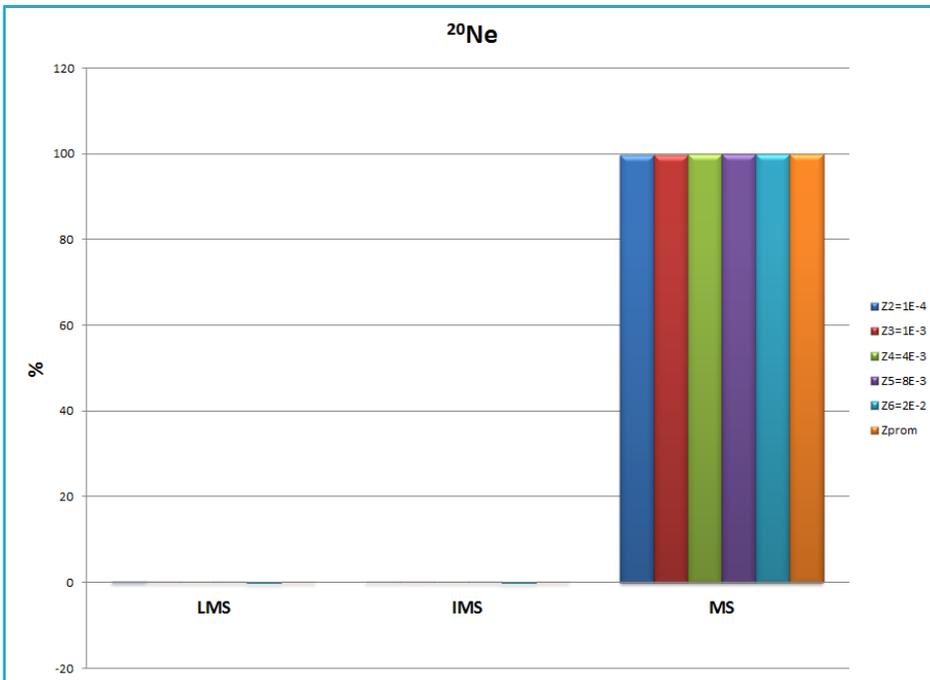


Figura 4.17: Contribución porcentual de ^{20}Ne , Z_i como en figura 4.13

Como se puede observar en la figura 4.17 y en la tabla 4.5, en Z_{prom} la población que enriquece de manera dominante al medio interestelar con ^{20}Ne es la de las MS con el 99.84%, las LMS con 0.12% (observando un consumo de -0.002% en Z_6) y las IMS con 0.04% (observando un consumo de -0.007% en Z_6).

El ^{20}Ne es producido únicamente por las MS debido a las mismas razones explicadas para ^{16}O .

%	LMS	IMS	MS
Z2	0.31	0.07	99.62
Z3	0.22	0.06	99.72
Z4	0.05	0.04	99.91
Z5	0.02	0.03	99.95
Z6	0.00	-0.01	100.01
Z_{prom}	0.12	0.04	99.84

Tabla 4.5: Contribución porcentual de ^{20}Ne , Z_i como en tabla 4.1

^{59}Co :

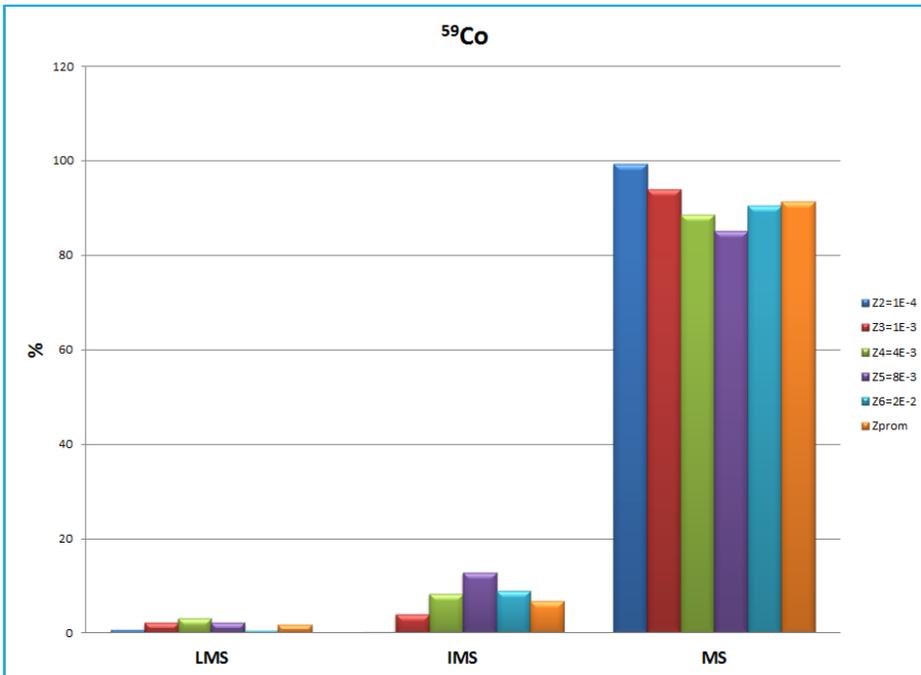


Figura 4.18: Contribución porcentual de ^{59}Co , Zi como en figura 4.13

%	LMS	IMS	MS
Z2	0.64	0.14	99.22
Z3	2.16	3.99	93.84
Z4	3.18	8.29	88.53
Z5	2.19	12.81	85.00
Z6	0.59	8.98	90.43
Zprom	1.75	6.84	91.41

Tabla 4.7: Contribución porcentual de ^{59}Co , Zi como en tabla 4.1

Como se puede observar en la figura 4.18 y en la tabla 4.7, en Zprom, las MS contribuyen al enriquecimiento de ^{59}Co con 91.5%, las IMS con el 6.8% y las LMS con 1.7%.

Para todas las metalicidades se mantiene la mayor contribución por parte de las MS debido a que al final de la cadena CNO se generan ^{18}O . A partir del cual se produce otra cadena de reacciones que generan neutrones libres, los cuales son absorbidos por núcleos de ^{56}Fe , para producir ^{59}Co .

^{48}Ti y ^{70}Zn :

%	LMS	IMS	MS
Z1	0	0	100
Z2	0	0	100
Z3	0	0	100
Z4	0	0	100
Z5	0	0	100
Z6	0	0	100

Tabla 4.6: Contribución porcentual de ^{48}Ti y ^{70}Zn , Z_i como en tabla 4.1

Como se puede observar en la tabla 4.6, las estrellas masivas enriquecen totalmente al medio interestelar con ^{48}Ti y ^{70}Zn , debido a que los yields estelares son nulos para las LMS e IMS.

Z:

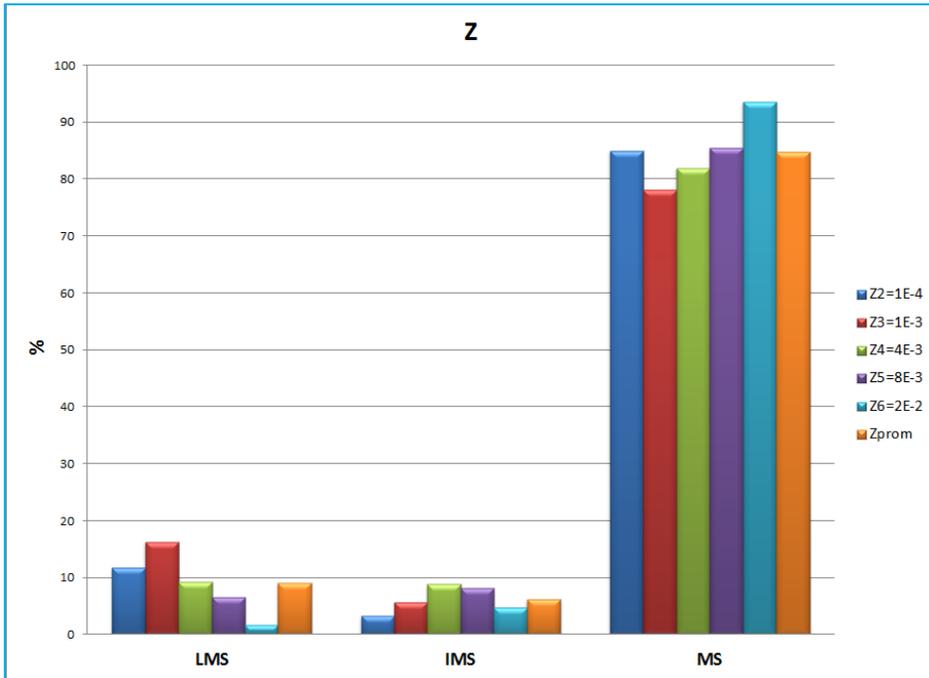


Figura 4.19: Contribución porcentual de Z, Zi como en figura 4.13

Como se puede observar en la figura 4.19 y la tabla 4.8, en Zprom, las MS contribuyen al enriquecimiento de Z con 84.8%, las LMS con 9.1% y las IMS con 6.1%.

Para todas las metalicidades se mantiene la mayor contribución por parte de las MS, semejante al ^{16}O . Esto se debe a que aproximadamente el 60% de los elementos más pesados que el helio corresponde a oxígeno.

%	LMS	IMS	MS
Z2	11.76	3.27	84.97
Z3	16.22	5.70	78.08
Z4	9.29	8.81	81.90
Z5	6.51	8.09	85.41
Z6	1.69	4.70	93.61
Zprom	9.09	6.11	84.79

Tabla 4.8: Contribución porcentual de Z, Zi como en tabla 4.1

5.-CONCLUSIONES

- Se calcularon los yields de poblaciones estelares (Y_i , la eficiencia de sintetizar un determinado elemento químico) de 106 especies químicas, para 6 valores de metalicidad estelar iniciales (Z_i).
- Se tomó una muestra representativa de las 106 especies químicas. Está conformada por los elementos más abundantes en el Universo (^1H , ^4He , ^{12}C , ^{14}N , ^{16}O y ^{20}Ne), un elemento α pesado (^{48}Ti), un elemento s (^{59}Co) y un elemento r (^{70}Zn). Además de considerar Z el cual representa la suma de todos los elementos más pesados que el He.
- Para estos elementos representativos, se contabilizó la aportación de las estrellas de baja masa (LMS, 1-3 M_{Sun}), estrellas de masa intermedia (IMS, 3-8 M_{Sun}) y estrellas masivas (MS, 8 M_{Sun} - m_{sup}) al enriquecimiento químico del medio interestelar.
- Se calcularon los Y_i , para los elementos representativos, aumentando la masa superior (m_{sup}) de la muestra estelar. Se eligieron 7 valores diferentes de m_{sup} (10-100 M_{Sun}). Esto para conocer cómo cambia la aportación de los diferentes tipos de estrellas según m_{sup} .
 - Para todos los elementos, los yields de LMS y IMS casi no dependen con m_{sup} .
 - Para los elementos producidos principalmente por MS (^{16}O , ^{20}Ne , ^{48}Ti , ^{59}Co y ^{70}Zn) los Y_i de MS aumentan considerablemente con el valor de m_{sup} .
 - Para los elementos producidos por MS, IMS y LMS (^4He , ^{12}C y ^{14}N) los Y_i de MS incrementan cuando crece m_{sup} , de manera importante.

- Considerando $m_{\text{sup}}=60 M_{\text{Sun}}$ y el promedio de las Z_i , las MS, IMS y LMS enriquecen al medio interestelar con diferentes porcentajes:
 - El ^1H siempre se consume en todas las estrellas, para generar el resto de los elementos.
 - La $\frac{1}{2}$ del ^4He es producido por las MS (47%), $\frac{1}{4}$ por las IMS (27%) y $\frac{1}{4}$ por las LMS (26%).
 - La $\frac{1}{2}$ del ^{12}C es producido por las MS (48%), $\frac{1}{10}$ por las IMS (12%) y $\frac{4}{10}$ por las LMS (40%).
 - El $\frac{1}{5}$ del ^{14}N es producido por las MS (21%), $\frac{3}{4}$ por las IMS (72%) y $\frac{1}{20}$ por las LMS (7%).
 - La totalidad del ^{16}O , ^{20}Ne , ^{48}Ti y ^{70}Zn es producido por las MS (100%).
 - La mayor parte del ^{59}Co es producido por las MS (92%) y el resto por las IMS (7%) y las LMS (1%).
 - La mayoría de Z es producido por las MS (85%), y el resto por las IMS (6%) y por las LMS (9%).

8.-BIBLIOGRAFÍA

- Baker J., Bizarro M., Witting N., Connelly J., Haack H. 2005. "Early planetesimal melting from age of 45662 Gyr for differentiated meteorites". Nature.
- Bromm, Volker; Larson, Richard B. 2004. "The first stars". Annual Review of Astronomy and Astrophysics.
- Burbidge E.M., Burbidge G. R., Fowler W. A., Hoyle F.1957. "Synthesis of the elements in stars". Reviews of Modern Physics.
- Carigi L." La química y el Universo".2012. Capítulo 2: Evolución química y zonas habitables en el Universo. Colegio Nacional.
- Carigi, L. & Peimbert, M. 2011. "H II regions and protosolar abundances in galactic chemical evolution". Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica.
- Carigi, L. & Peimbert, M. 2008. "The helium and heavy elements enrichment of the galaxy disk". Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica.
- Carigi L., Peimbert M., Esteban C., Garcia-Rojas J. 2005. "Carbon, nitrogen, and oxygen galactic gradients: A solution to the carbon enrichment problem". The Astrophysical Journal.
- Donald D. Clayton. 1968. "Principles of stellar evolution and nucleosynthesis". Mc-Graw Hill, New York.
- Geha M., Brown T., Tumlinson J., Kalirai J., Simon J., Kirby E., VanderBerg Don., Muñoz R., Avila R., Guhathakurta P., Ferguson H.2013. "The stellar initial mass function of ultra-faint dwarf galaxies evidence for IMF variations whit galactic environment". The Astrophysical Journal.
- Gradstein F.M, Ogg J.G, Smith A.G, Bleeker W., Lourens L.J. 2004. "A new geologic time scale with special reference to Precambrian and Neogene". Episodes.
- Hernández-Martínez L., Carigi L, Peimbert M. 2011. "Planetary nebulae as observational constraints in chemical evolution models for NGC 6822". Astronomy and Astrophysics.

- Houdek, G. y Gough, D. O. 2011. "On the seismic age and heavy-element abundance of the Sun". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.
- Kamen, Martin D. 1963. "Early history of carbon-14: Discovery of this supremely important tracer was expected in the physical sense but not in the chemical sense". Science.
- Karakas A.I. 2010. "Updated stellar yields from asymptotic giant branch models". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society of Australia.
- Karakas A., Lattanzio J.2007. "Stellar models and yields of asymptotic giant branch stars". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society of Australia.
- Kobayashi C., Umeda H., Nomoto K., Tominaga N. & Ohkubo T et al. 2006."Galactic chemical evolution: carbon through zinc". The Astrophysical Journal.
- Kobayashi C., Karakas A., Umeda H. 2011. "The evolution of isotope ratios in the Milky Way Galaxy". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society of Australia.
- Kroupa P., Weidner C., Pflamm-Altenburg J., Thies I.,Dabringhausen J., Marks M. & Maschberger T 2012. "The stellar and sub-stellar IMF of simple and composite populations". Astronomic and astrophysics reviews.
- Kroupa P., Weidner C.,Pflamm-Altenburg J., Thies I.,Dabringhausen J., Marks M. & Maschberger T. 2013. "In planets, stars and stellar Systems. Springer.
- Marigo & Girardi. 2001. "Coupling emitted light and chemical yields from stars: a basic constraint to population synthesis models of galaxies". Astronomy and astrophysics.
- Matteucci F. 2012. "Chemical Evolution of Galaxies". Ed. Springer.
- Nomoto Ken'chi, Kobayashi Chiak & Tominga Nozomu. 2013. "Nucleosynthesis in stars and the chemical enrichment of galaxies". Annual review of astronomic and astrophysics.
- Pagel, B. E. J. 2009. "Nucleosynthesis and Chemical Evolution of Galaxies". Cambridge University Press.

- Robles-Valdez F., Carigi L., Peimbert M. 2013. "Outside-in stellar formation in the spiral galaxy M33?". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society of Australia.
- Rolfs Claus E., Rodney William S. 1988. "Cauldrons in the cosmos". The University of Chicago Press.
- Sackmann I.J, Boothroyd A.I. 2003. "Our Sun. V. A bright young Sun consistent with helioseismology and warm temperatures on ancient Earth and Mars. The Astrophysical Journal.
- Suess, H., Urey H. 1956. "Abundances of the elements". Review of modern physics.
- Steigman, G. 2004. "Primordial Alchemy: From the Big Bang to the present Universe". Cambridge University Press.
- Tauris, T. M., van den Heuvel, E. P. 2003. "Formation and evolution of compact stellar X-ray sources. Astro-ph.
- Thies I., Pflamm-Altenburg J., Kroupa P., Marks M. 2015. "Characterizing the brown dwarf formation channels from the IMF and binary- star dynamic".
- Tinsley B.M. 1980. "Evolution of the stars and gas in galaxies". Fundamentals of cosmic physics. Astro-ph.
- Zaninetti Lorenzo. 2013. "The initial mass function modeled by a left truncated beta distribution". Astronomic and astrophysics reviews.

APÉNDICE A

RESULTADOS YIELDS NETOS (Y_i) y R .

R

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	0.0000E+00	1.3548E-01	1.3743E-01	1.4397E-01	1.4717E-01	1.5008E-01
20	0.0000E+00	1.3086E-01	1.3274E-01	1.3906E-01	1.4215E-01	1.4495E-01
30	0.0000E+00	1.2909E-01	1.3095E-01	1.3718E-01	1.4023E-01	1.4300E-01
40	0.0000E+00	1.2817E-01	1.3001E-01	1.3620E-01	1.3923E-01	1.4197E-01
60	0.0000E+00	1.2712E-01	1.2895E-01	1.3508E-01	1.3808E-01	1.4081E-01
80	0.0000E+00	1.2657E-01	1.2839E-01	1.3450E-01	1.3749E-01	1.4020E-01
100	0.0000E+00	1.2619E-01	1.2801E-01	1.3410E-01	1.3708E-01	1.3979E-01

Tabla A.1: Valores de R para LMS

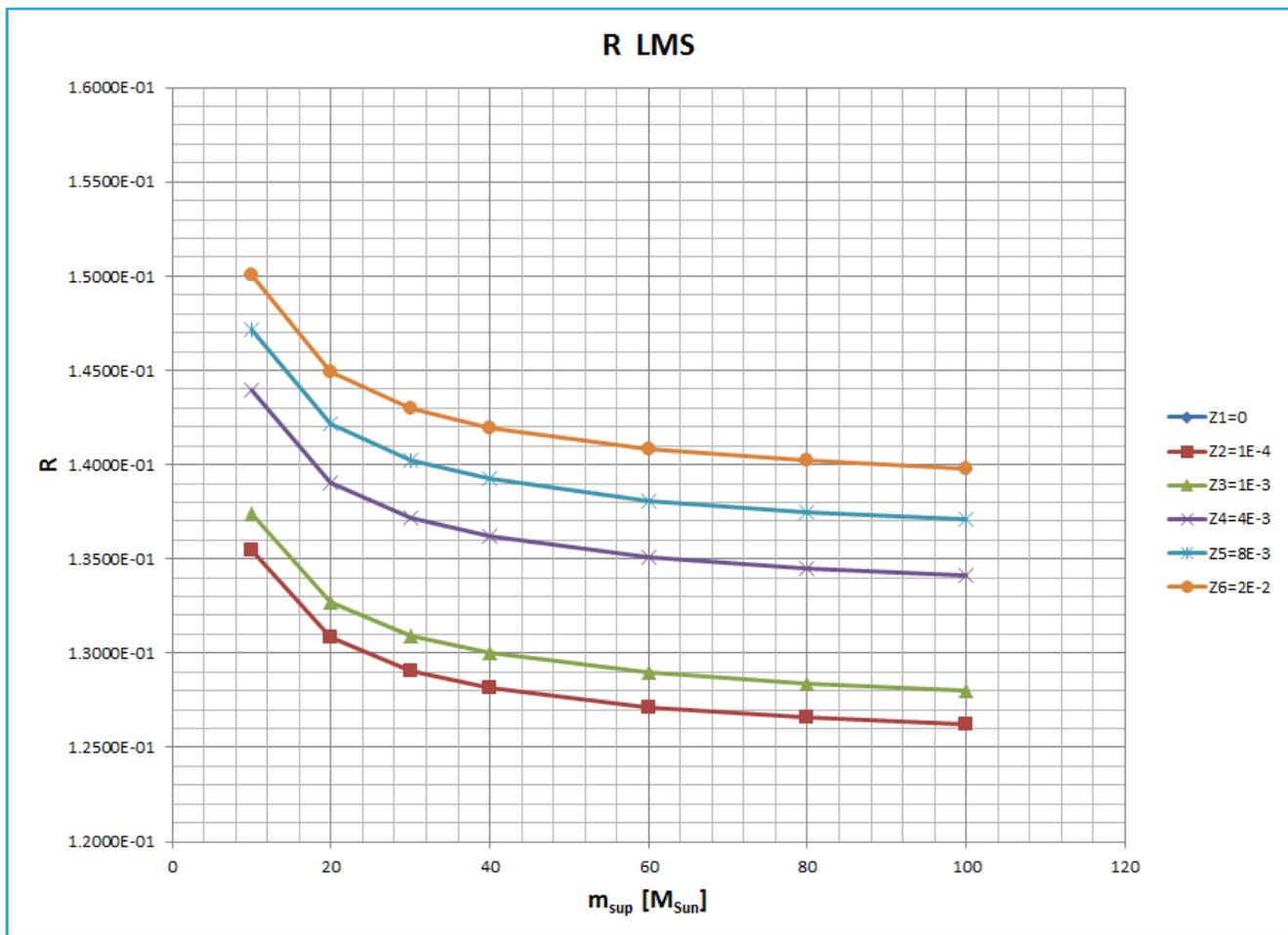


Figura A.1: Gráfica de R vs m para LMS. Los valores de Z_1 para todo el rango de m_{sup} son cero.

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	0.0000E+00	8.4471E-02	8.4691E-02	8.5421E-02	8.6140E-02	8.6761E-02
20	0.0000E+00	8.1588E-02	8.1800E-02	8.2505E-02	8.3199E-02	8.3800E-02
30	0.0000E+00	8.0487E-02	8.0696E-02	8.1392E-02	8.2077E-02	8.2669E-02
40	0.0000E+00	7.9910E-02	8.0118E-02	8.0809E-02	8.1489E-02	8.2077E-02
60	0.0000E+00	7.9255E-02	7.9461E-02	8.0147E-02	8.0821E-02	8.1404E-02
80	0.0000E+00	7.8914E-02	7.9120E-02	7.9802E-02	8.0473E-02	8.1054E-02
100	0.0000E+00	7.8679E-02	7.8883E-02	7.9564E-02	8.0233E-02	8.0812E-02

Tabla A.2: Valores de R para IMS

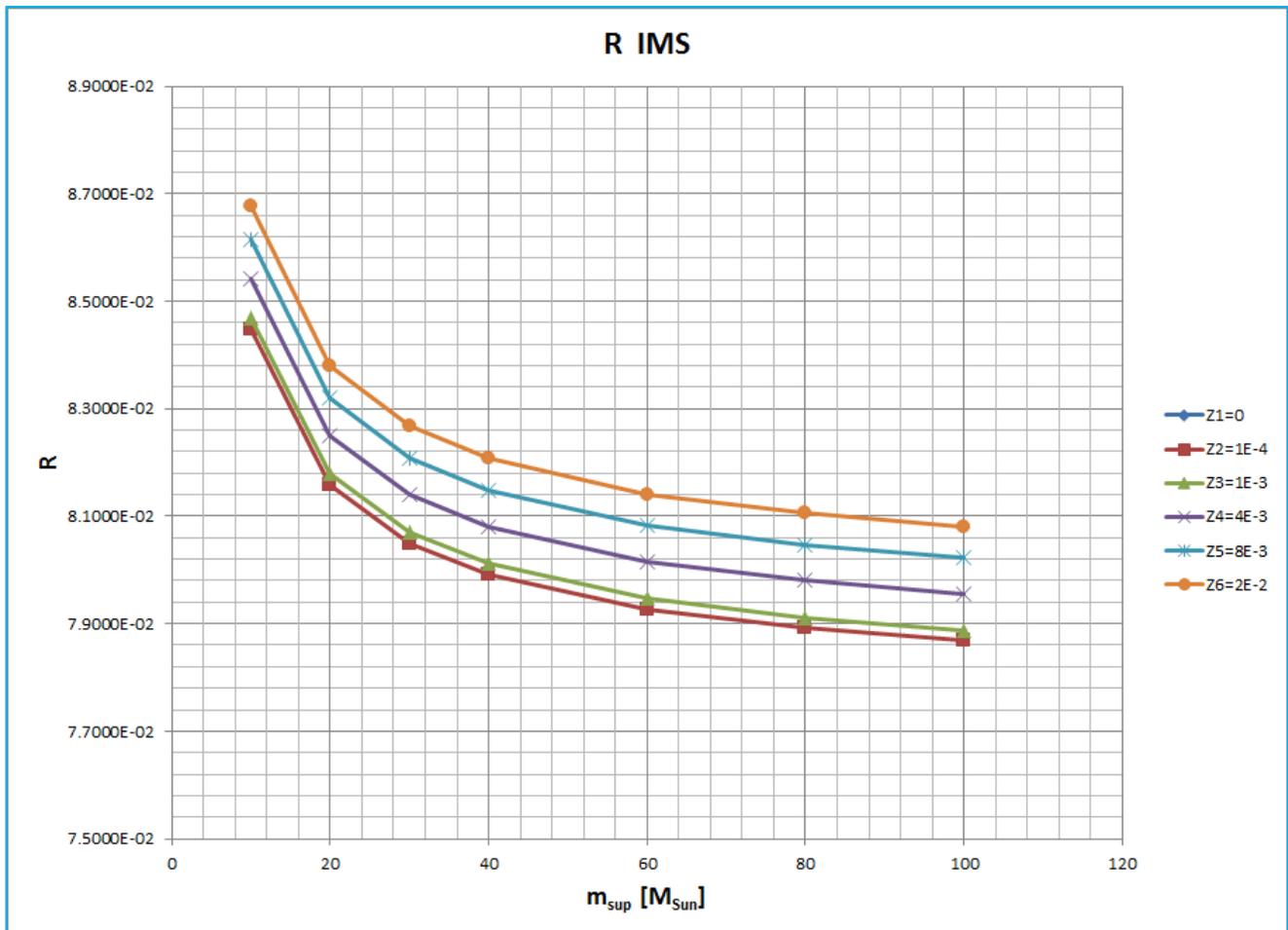


Figura A.2: Gráfica de R vs m para IMS. Los valores de Z_1 para todo el rango de m_{sup} son cero.

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	8.5016E-02	1.3399E-02	1.3299E-02	1.3346E-02	1.3350E-02	1.3358E-02
20	8.7747E-02	4.3561E-02	4.3271E-02	4.3429E-02	4.3444E-02	4.3484E-02
30	8.9033E-02	5.5174E-02	5.4848E-02	5.5042E-02	5.5076E-02	5.5176E-02
40	8.9384E-02	6.1742E-02	6.1393E-02	6.1547E-02	6.1610E-02	6.1794E-02
60	8.9780E-02	6.8748E-02	6.8340E-02	6.8565E-02	6.8658E-02	6.8931E-02
80	9.0010E-02	7.2482E-02	7.2042E-02	7.2306E-02	7.2414E-02	7.2735E-02
100	9.0217E-02	7.5027E-02	7.4566E-02	7.4855E-02	7.4974E-02	7.5328E-02

Tabla A.3: Valores de R para MS

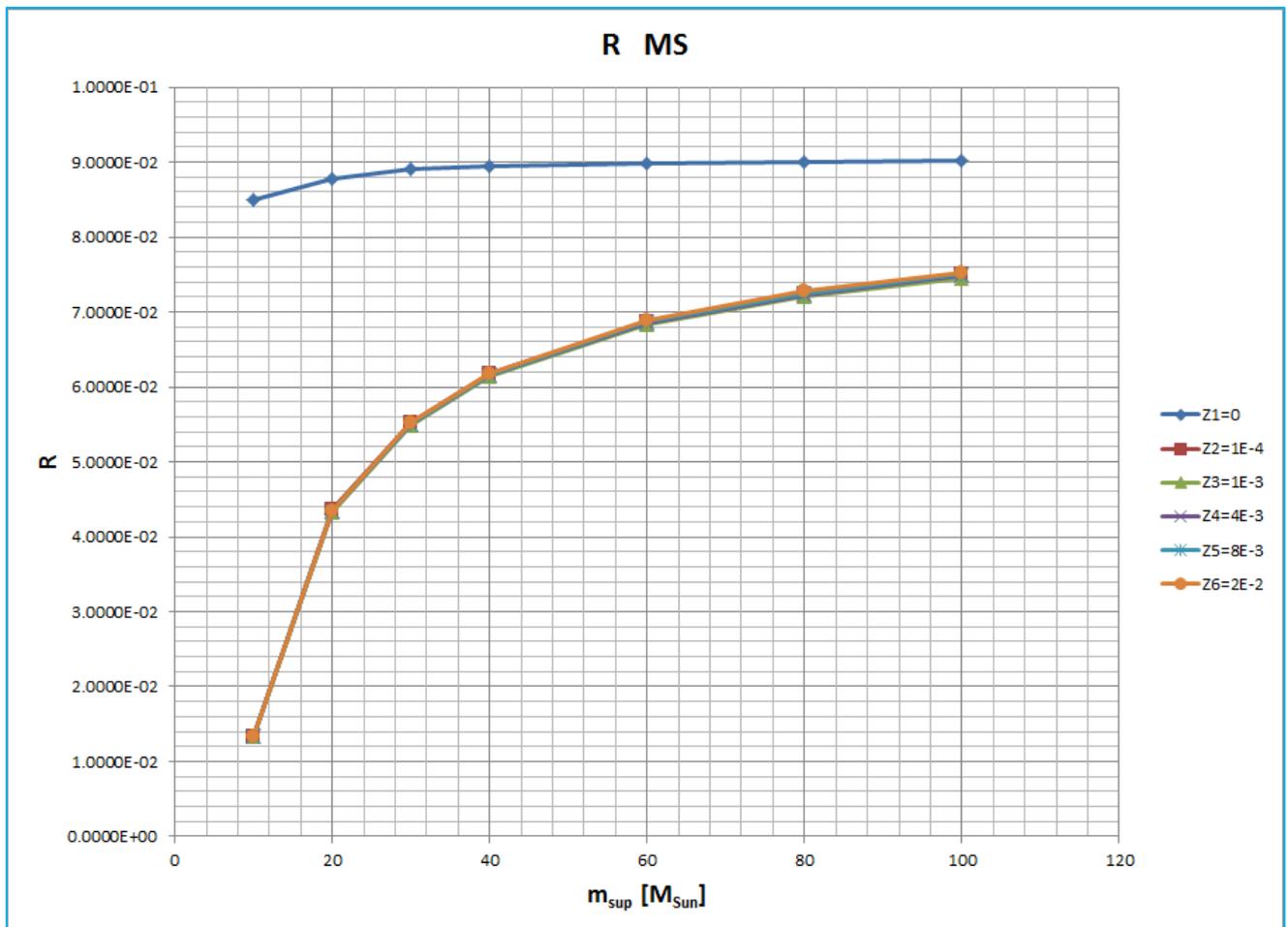


Figura A.3: Gráfica de R vs m para MS (valor de Z_1 dividido entre 10)

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	8.5016E-02	2.3335E-01	2.3542E-01	2.4274E-01	2.4666E-01	2.5020E-01
20	8.7747E-02	2.5601E-01	2.5781E-01	2.6499E-01	2.6879E-01	2.7224E-01
30	8.9033E-02	2.6475E-01	2.6649E-01	2.7362E-01	2.7738E-01	2.8084E-01
40	8.9384E-02	2.6982E-01	2.7152E-01	2.7856E-01	2.8232E-01	2.8585E-01
60	8.9780E-02	2.7512E-01	2.7675E-01	2.8379E-01	2.8756E-01	2.9115E-01
80	9.0010E-02	2.7797E-01	2.7955E-01	2.8661E-01	2.9038E-01	2.9399E-01
100	9.0217E-02	2.7990E-01	2.8146E-01	2.8852E-01	2.9229E-01	2.9593E-01

Tabla A.4: Valores de R desde $1 M_{\text{Sun}}$ hasta la m_{sup} (representados como ALL).

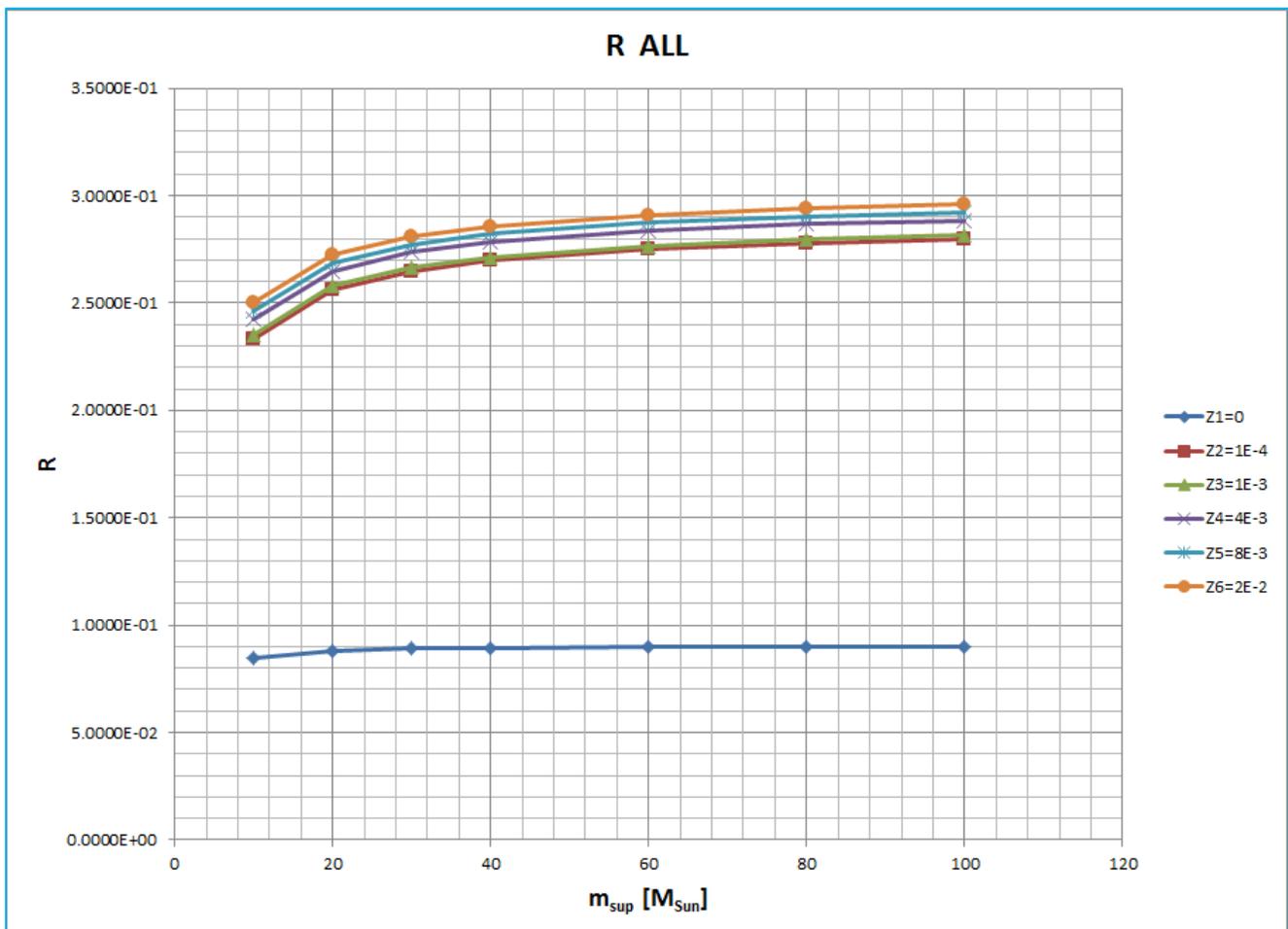


Figura A.4: Gráfica de R vs m para ALL (valor de Z_1 dividido entre 10)

1H

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	0.0000E+00	-1.1617E-02	-1.0314E-02	-5.9664E-03	-4.6152E-03	-2.2611E-03
20	0.0000E+00	-1.1220E-02	-9.9620E-03	-5.7628E-03	-4.4577E-03	-2.1839E-03
30	0.0000E+00	-1.1069E-02	-9.8275E-03	-5.6851E-03	-4.3976E-03	-2.1544E-03
40	0.0000E+00	-1.0990E-02	-9.7571E-03	-5.6443E-03	-4.3661E-03	-2.1390E-03
60	0.0000E+00	-1.0900E-02	-9.6771E-03	-5.5980E-03	-4.3303E-03	-2.1215E-03
80	0.0000E+00	-1.0853E-02	-9.6355E-03	-5.5740E-03	-4.3116E-03	-2.1123E-03
100	0.0000E+00	-1.0820E-02	-9.6067E-03	-5.5573E-03	-4.2988E-03	-2.1060E-03

Tabla A.5: Y_i de 1H para LMS

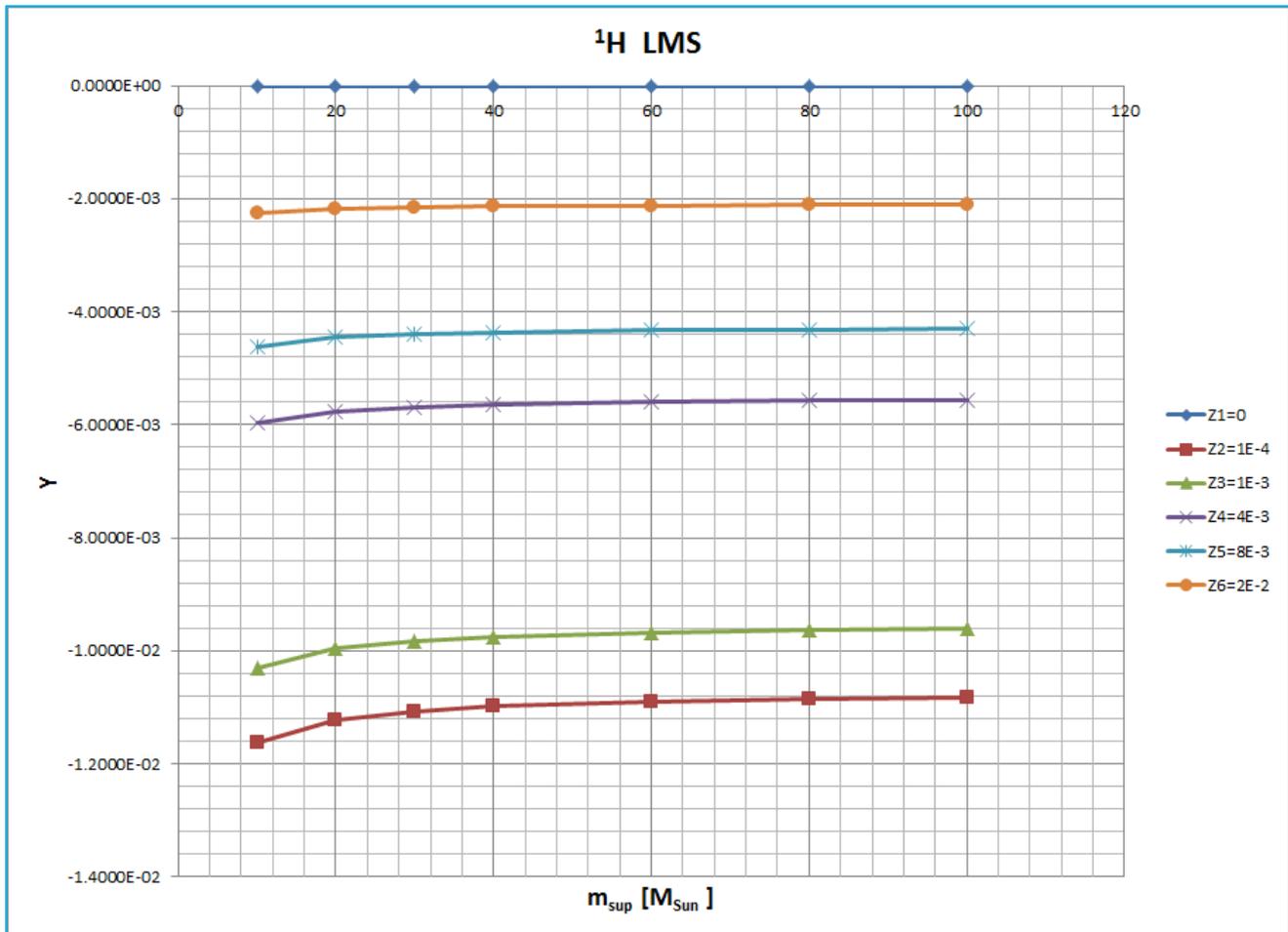


Figura A.5: Gráfica Y_i vs m de 1H para LMS.

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	0.0000E+00	-7.0303E-03	-6.9558E-03	-6.7062E-03	-5.4951E-03	-3.8042E-03
20	0.0000E+00	-6.7903E-03	-6.7184E-03	-6.4773E-03	-5.3076E-03	-3.6743E-03
30	0.0000E+00	-6.6987E-03	-6.6278E-03	-6.3899E-03	-5.2360E-03	-3.6248E-03
40	0.0000E+00	-6.6507E-03	-6.5803E-03	-6.3442E-03	-5.1985E-03	-3.5988E-03
60	0.0000E+00	-6.5962E-03	-6.5263E-03	-6.2921E-03	-5.1558E-03	-3.5693E-03
80	0.0000E+00	-6.5678E-03	-6.4983E-03	-6.2651E-03	-5.1337E-03	-3.5539E-03
100	0.0000E+00	-6.5482E-03	-6.4789E-03	-6.2464E-03	-5.1183E-03	-3.5433E-03

Tabla A.6: Y_i de 1H para IMS

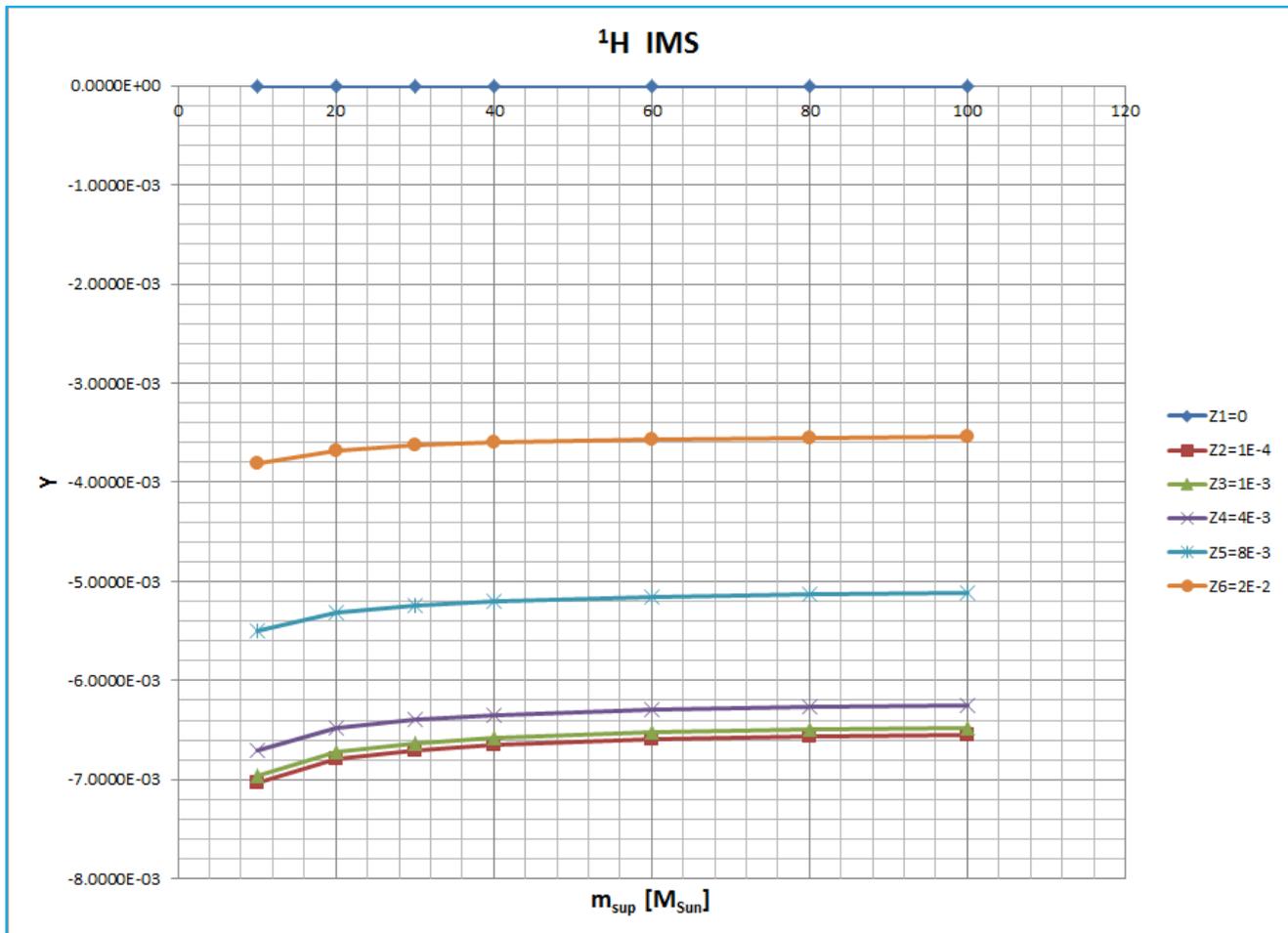


Figura A.6: Gráfica Y_i vs m de 1H para IMS

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	-3.6946E-02	-5.4317E-03	-2.3655E-03	-2.3309E-03	-2.1619E-03	-1.9949E-03
20	-3.9921E-02	-1.8636E-02	-8.2341E-03	-8.0264E-03	-7.4902E-03	-6.9581E-03
30	-4.3615E-02	-2.5446E-02	-1.1782E-02	-1.1194E-02	-1.0704E-02	-1.0218E-02
40	-4.5851E-02	-2.9886E-02	-1.4069E-02	-1.3294E-02	-1.3232E-02	-1.3175E-02
60	-4.8392E-02	-3.4977E-02	-1.6613E-02	-1.5633E-02	-1.6265E-02	-1.6901E-02
80	-4.9622E-02	-3.7689E-02	-1.7968E-02	-1.6879E-02	-1.7880E-02	-1.8884E-02
100	-5.0399E-02	-3.9538E-02	-1.8891E-02	-1.7729E-02	-1.8981E-02	-2.0237E-02

Tabla A.7: Y_i de 1H para MS

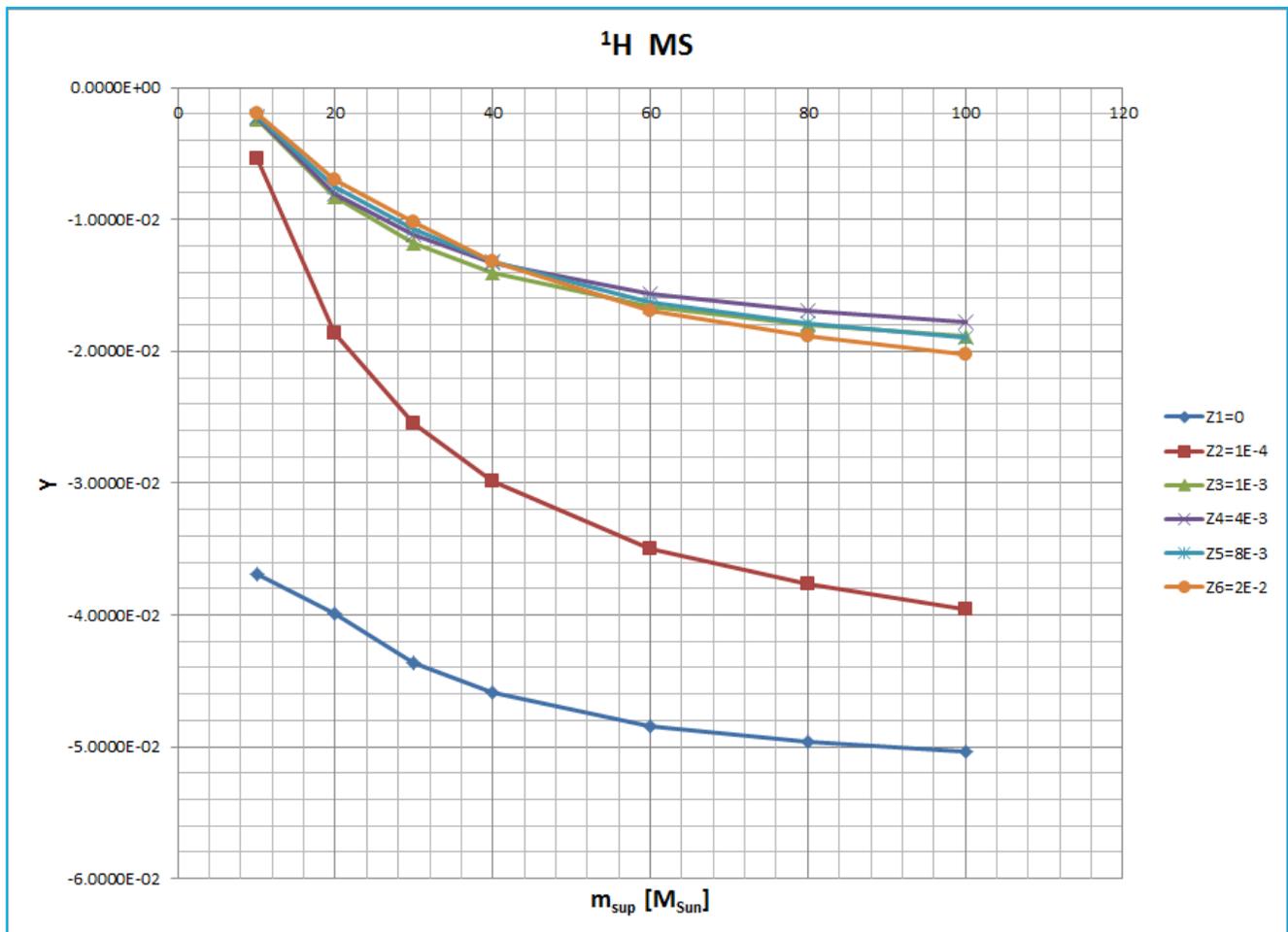


Figura A.7: Gráfica Y_i vs m de 1H para MS (valor de Z_1 dividido entre 10)

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	-3.6946E-02	-2.4079E-02	-1.9635E-02	-1.5004E-02	-1.2272E-02	-8.0601E-03
20	-3.9921E-02	-3.6647E-02	-2.4914E-02	-2.0266E-02	-1.7255E-02	-1.2816E-02
30	-4.3615E-02	-4.3214E-02	-2.8237E-02	-2.3269E-02	-2.0337E-02	-1.5997E-02
40	-4.5851E-02	-4.7526E-02	-3.0407E-02	-2.5282E-02	-2.2797E-02	-1.8913E-02
60	-4.8392E-02	-5.2473E-02	-3.2816E-02	-2.7523E-02	-2.5751E-02	-2.2591E-02
80	-4.9622E-02	-5.5109E-02	-3.4101E-02	-2.8718E-02	-2.7325E-02	-2.4551E-02
100	-5.0399E-02	-5.6906E-02	-3.4977E-02	-2.9532E-02	-2.8398E-02	-2.5886E-02

Tabla A.8: Y_i de ${}^1\text{H}$ para ALL

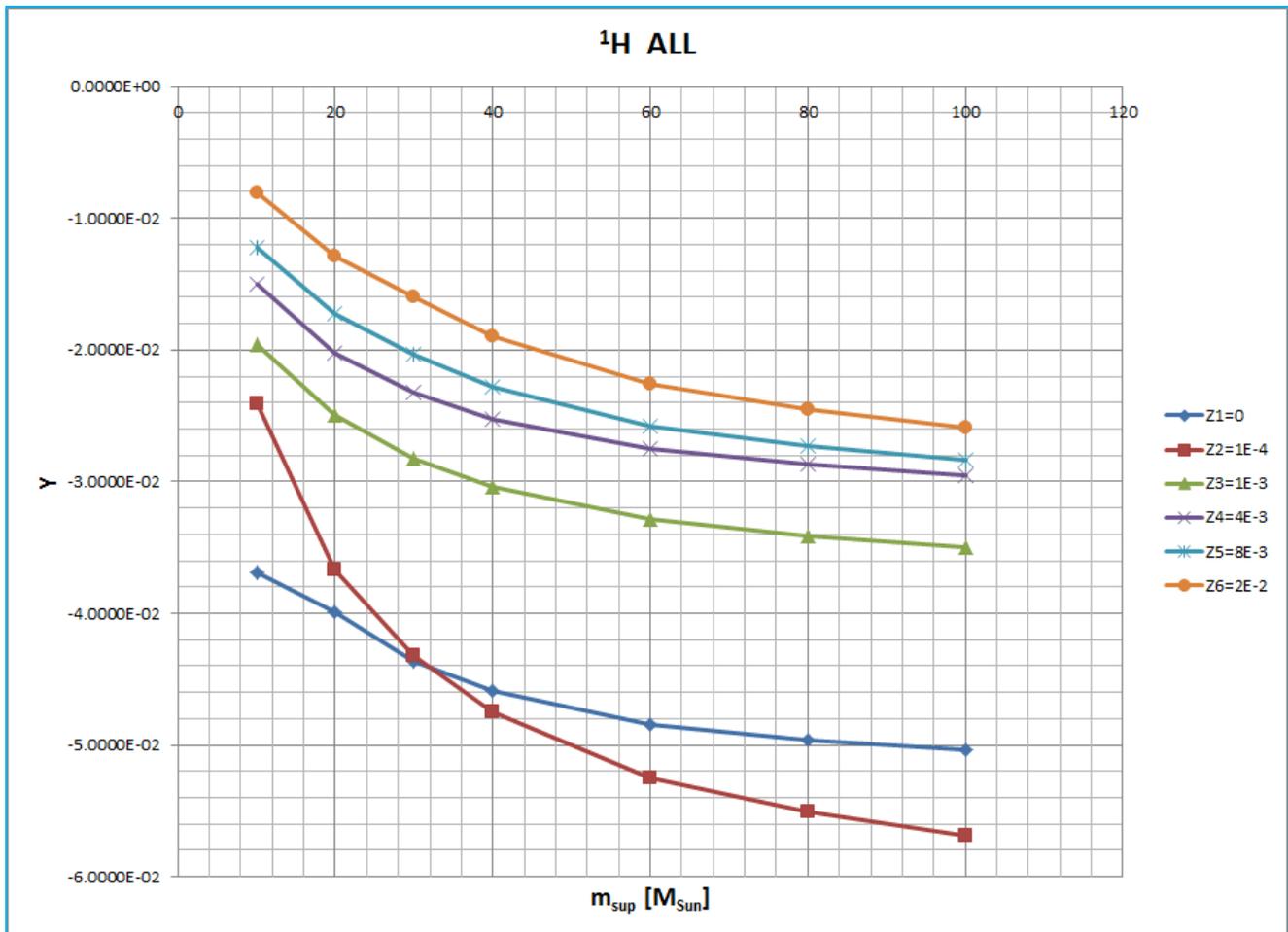


Figura A.8: Gráfica Y_i vs m de ${}^1\text{H}$ para ALL (valor de Z_1 dividido entre 10)

^4He

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	0.0000E+00	8.9218E-03	7.9792E-03	4.8335E-03	3.8605E-03	2.0563E-03
20	0.0000E+00	8.6173E-03	7.7069E-03	4.6686E-03	3.7287E-03	1.9862E-03
30	0.0000E+00	8.5010E-03	7.6029E-03	4.6056E-03	3.6784E-03	1.9594E-03
40	0.0000E+00	8.4401E-03	7.5485E-03	4.5726E-03	3.6521E-03	1.9453E-03
60	0.0000E+00	8.3709E-03	7.4866E-03	4.5351E-03	3.6221E-03	1.9294E-03
80	0.0000E+00	8.3349E-03	7.4544E-03	4.5156E-03	3.6065E-03	1.9211E-03
100	0.0000E+00	8.3100E-03	7.4321E-03	4.5021E-03	3.5958E-03	1.9153E-03

Tabla A.9: Y_i de ^4He para LMS

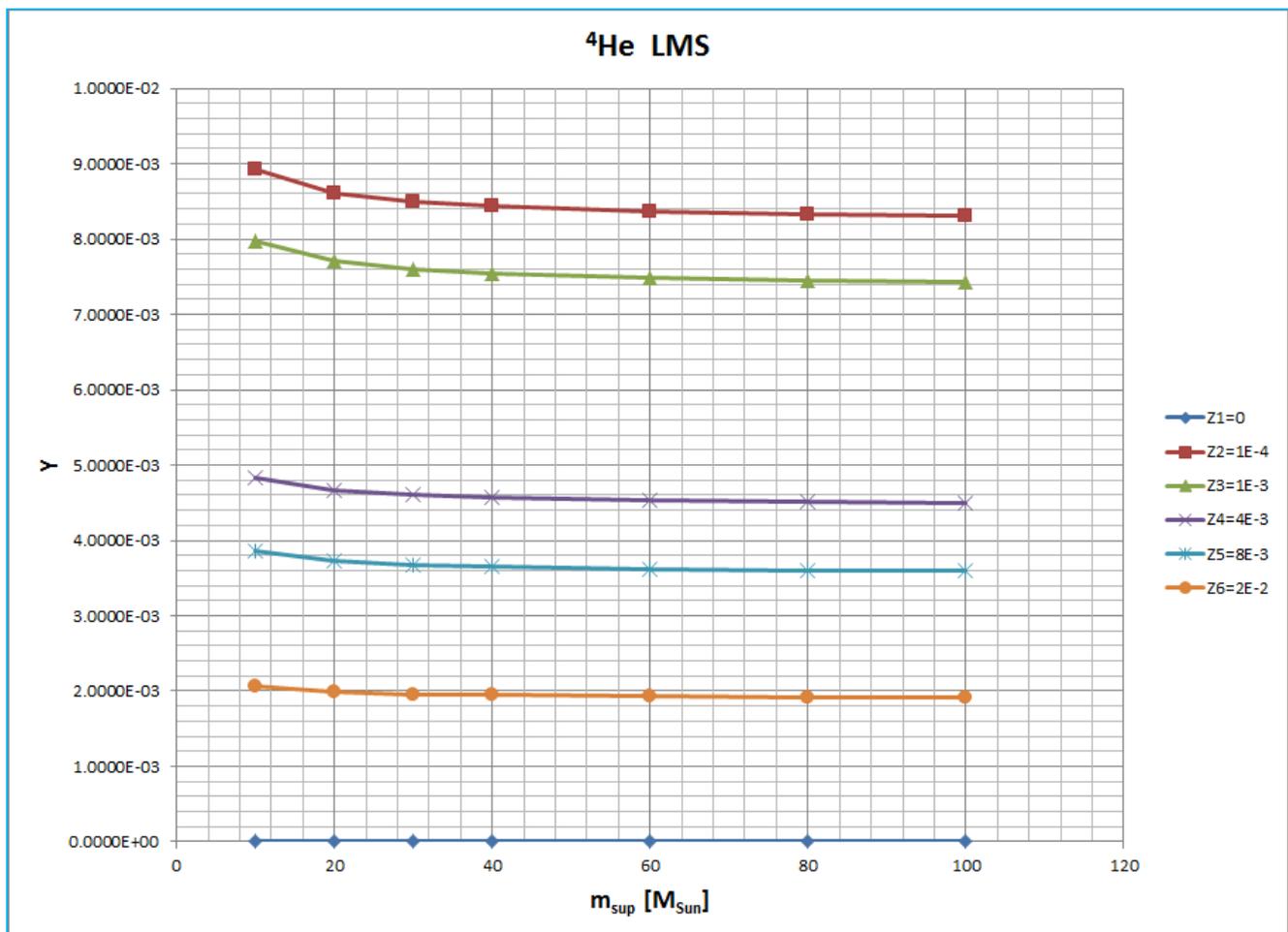


Figura A.9: Gráfica Y_i vs m de ^4He para LMS

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	0.0000E+00	6.2872E-03	6.1439E-03	5.6646E-03	4.6020E-03	3.3420E-03
20	0.0000E+00	6.0727E-03	5.9342E-03	5.4712E-03	4.4449E-03	3.2279E-03
30	0.0000E+00	5.9907E-03	5.8541E-03	5.3974E-03	4.3849E-03	3.1844E-03
40	0.0000E+00	5.9478E-03	5.8122E-03	5.3588E-03	4.3535E-03	3.1616E-03
60	0.0000E+00	5.8990E-03	5.7645E-03	5.3148E-03	4.3178E-03	3.1356E-03
80	0.0000E+00	5.8737E-03	5.7397E-03	5.2920E-03	4.2992E-03	3.1221E-03
100	0.0000E+00	5.8561E-03	5.7226E-03	5.2762E-03	4.2864E-03	3.1128E-03

Tabla A.10: Y_i de ${}^4\text{He}$ para IMS

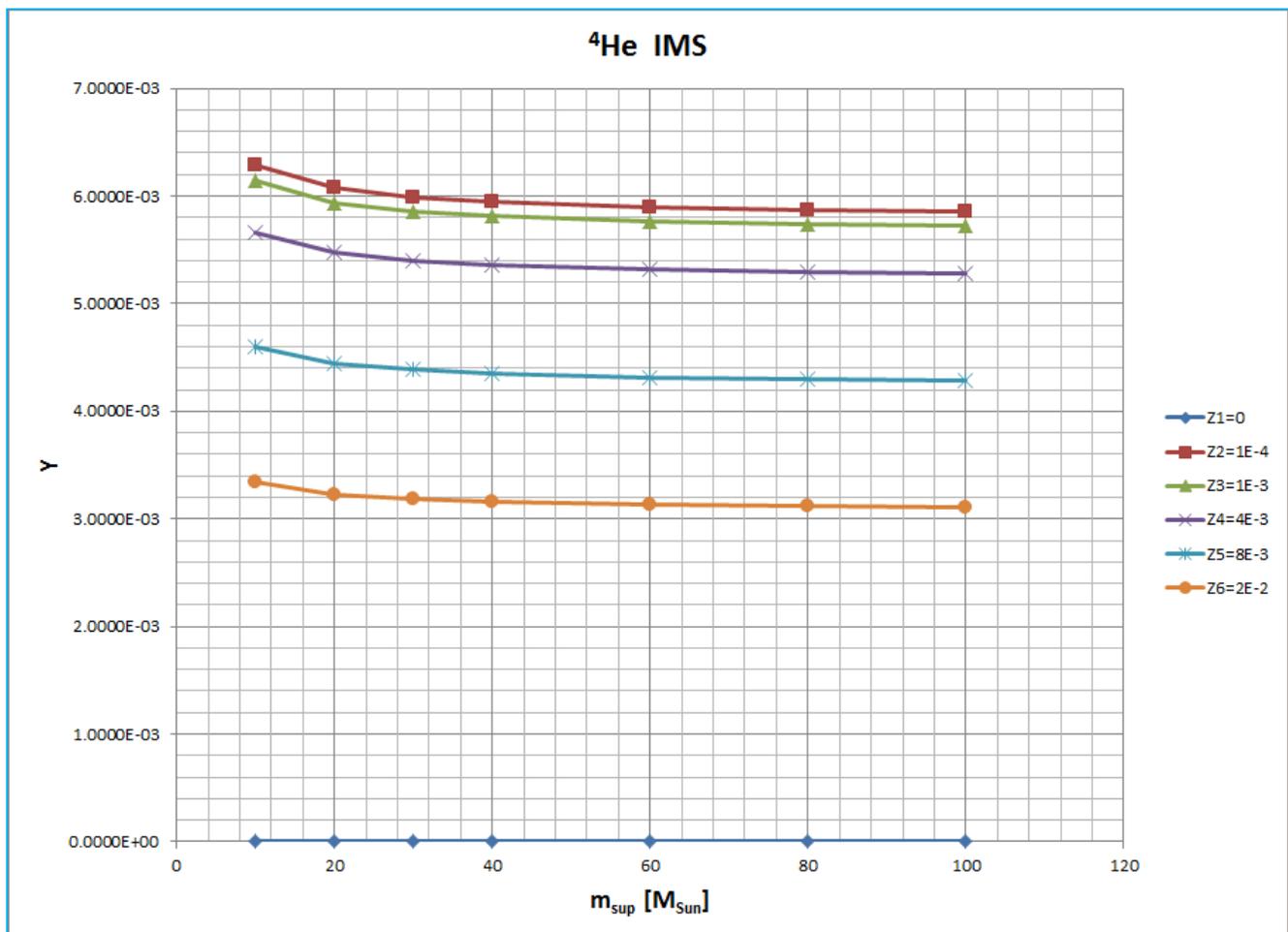


Figura A.10: Gráfica Y_i vs m de ${}^4\text{He}$ para IMS

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	2.4180E-02	3.5234E-03	1.2411E-03	1.4028E-03	1.4345E-03	1.4670E-03
20	2.4129E-02	1.1202E-02	4.6427E-03	4.9489E-03	4.9859E-03	5.0237E-03
30	2.4107E-02	1.3948E-02	5.3950E-03	6.2924E-03	6.3574E-03	6.4234E-03
40	2.3865E-02	1.5372E-02	5.7798E-03	6.5120E-03	6.9597E-03	7.4084E-03
60	2.3666E-02	1.6884E-02	6.1967E-03	6.5622E-03	7.4493E-03	8.3373E-03
80	2.3583E-02	1.7690E-02	6.4191E-03	6.5896E-03	7.7104E-03	8.8322E-03
100	2.3551E-02	1.8239E-02	6.5705E-03	6.6079E-03	7.8883E-03	9.1696E-03

Tabla A.11: Y_i de ${}^4\text{He}$ para MS

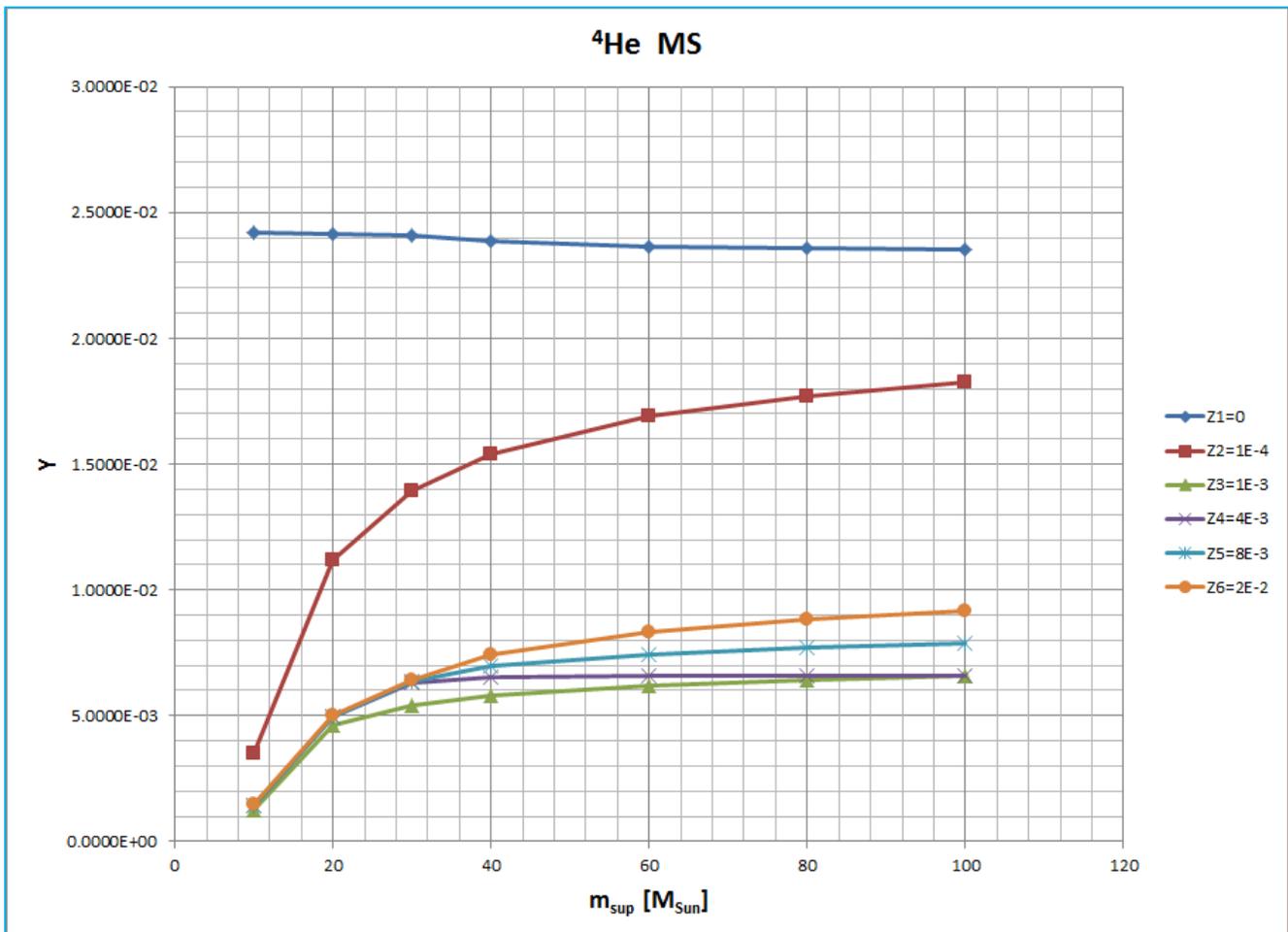


Figura A.11: Gráfica Y_i vs m de ${}^4\text{He}$ para MS (valor de Z_1 dividido entre 10)

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	2.4180E-02	1.8732E-02	1.5364E-02	1.1901E-02	9.8969E-03	6.8653E-03
20	2.4129E-02	2.5892E-02	1.8284E-02	1.5089E-02	1.3160E-02	1.0238E-02
30	2.4107E-02	2.8439E-02	1.8852E-02	1.6295E-02	1.4421E-02	1.1567E-02
40	2.3865E-02	2.9760E-02	1.9140E-02	1.6443E-02	1.4965E-02	1.2515E-02
60	2.3666E-02	3.1154E-02	1.9448E-02	1.6412E-02	1.5389E-02	1.3402E-02
80	2.3583E-02	3.1899E-02	1.9613E-02	1.6397E-02	1.5616E-02	1.3875E-02
100	2.3551E-02	3.2405E-02	1.9725E-02	1.6386E-02	1.5770E-02	1.4198E-02

Tabla A.12: Y_i de ${}^4\text{He}$ para ALL

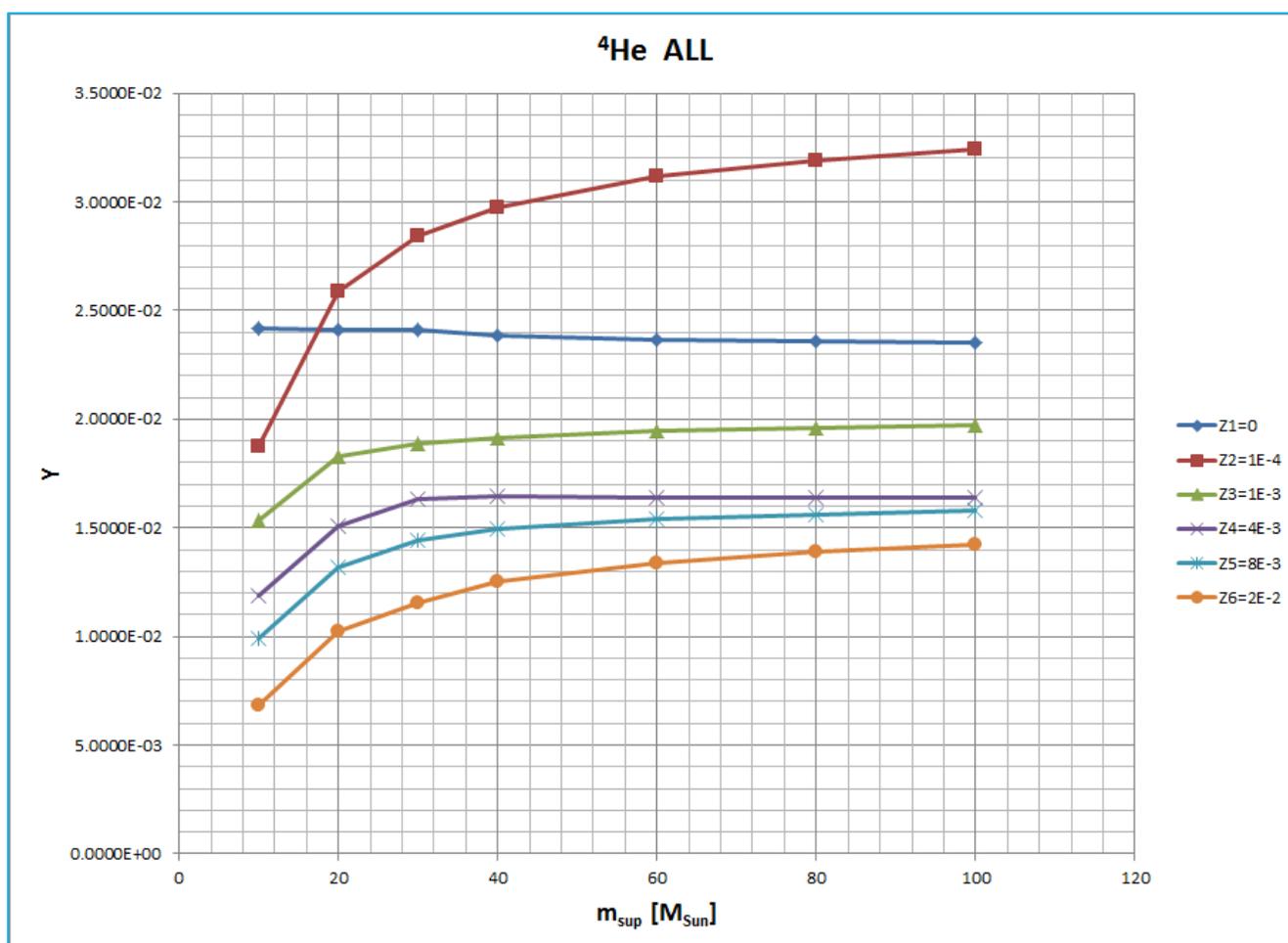


Figura A.12: Gráfica Y_i vs m de ${}^4\text{He}$ para ALL (valor de Z_i dividido entre 10)

^{12}C

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	0.0000E+00	2.3668E-03	2.0452E-03	9.7356E-04	5.9763E-04	5.9696E-06
20	0.0000E+00	2.2860E-03	1.9754E-03	9.4033E-04	5.7724E-04	5.7658E-06
30	0.0000E+00	2.2552E-03	1.9487E-03	9.2764E-04	5.6945E-04	5.6882E-06
40	0.0000E+00	2.2390E-03	1.9348E-03	9.2100E-04	5.6537E-04	5.6470E-06
60	0.0000E+00	2.2206E-03	1.9189E-03	9.1344E-04	5.6073E-04	5.6007E-06
80	0.0000E+00	2.2111E-03	1.9107E-03	9.0952E-04	5.5832E-04	5.5769E-06
100	0.0000E+00	2.2045E-03	1.9050E-03	9.0680E-04	5.5665E-04	5.5604E-06

Tabla A.13: Y_i de ^{12}C para LMS

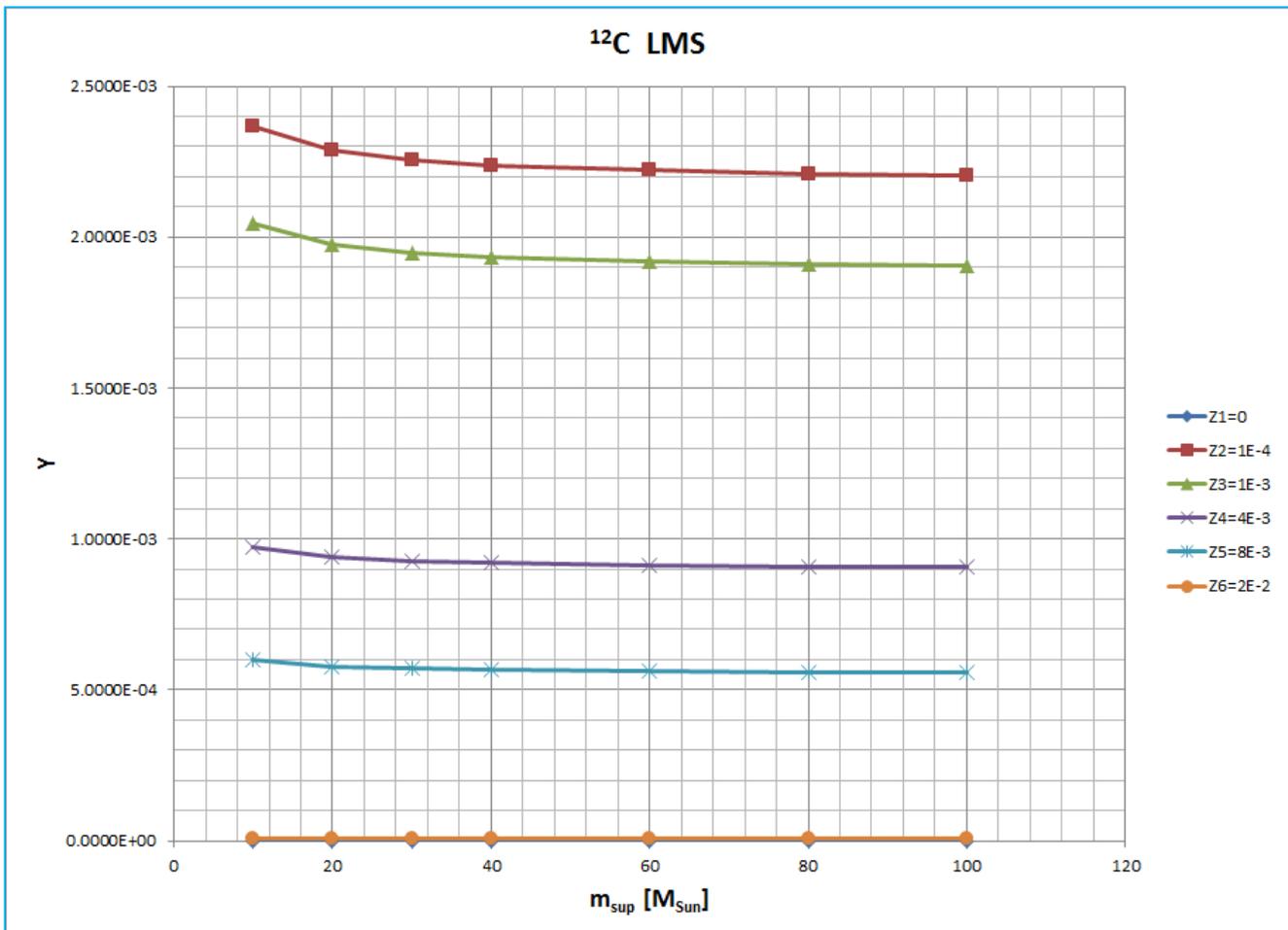


Figura A.13: Gráfica Y_i vs m de ^{12}C para LMS

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	0.0000E+00	1.7831E-04	2.1282E-04	3.2783E-04	3.4732E-04	1.6584E-04
20	0.0000E+00	1.7223E-04	2.0555E-04	3.1663E-04	3.3547E-04	1.6018E-04
30	0.0000E+00	1.6990E-04	2.0278E-04	3.1236E-04	3.3094E-04	1.5802E-04
40	0.0000E+00	1.6868E-04	2.0133E-04	3.1013E-04	3.2857E-04	1.5689E-04
60	0.0000E+00	1.6730E-04	1.9968E-04	3.0758E-04	3.2588E-04	1.5560E-04
80	0.0000E+00	1.6658E-04	1.9882E-04	3.0626E-04	3.2447E-04	1.5493E-04
100	0.0000E+00	1.6608E-04	1.9822E-04	3.0534E-04	3.2350E-04	1.5447E-04

Tabla A.14: Y_i de ^{12}C para IMS

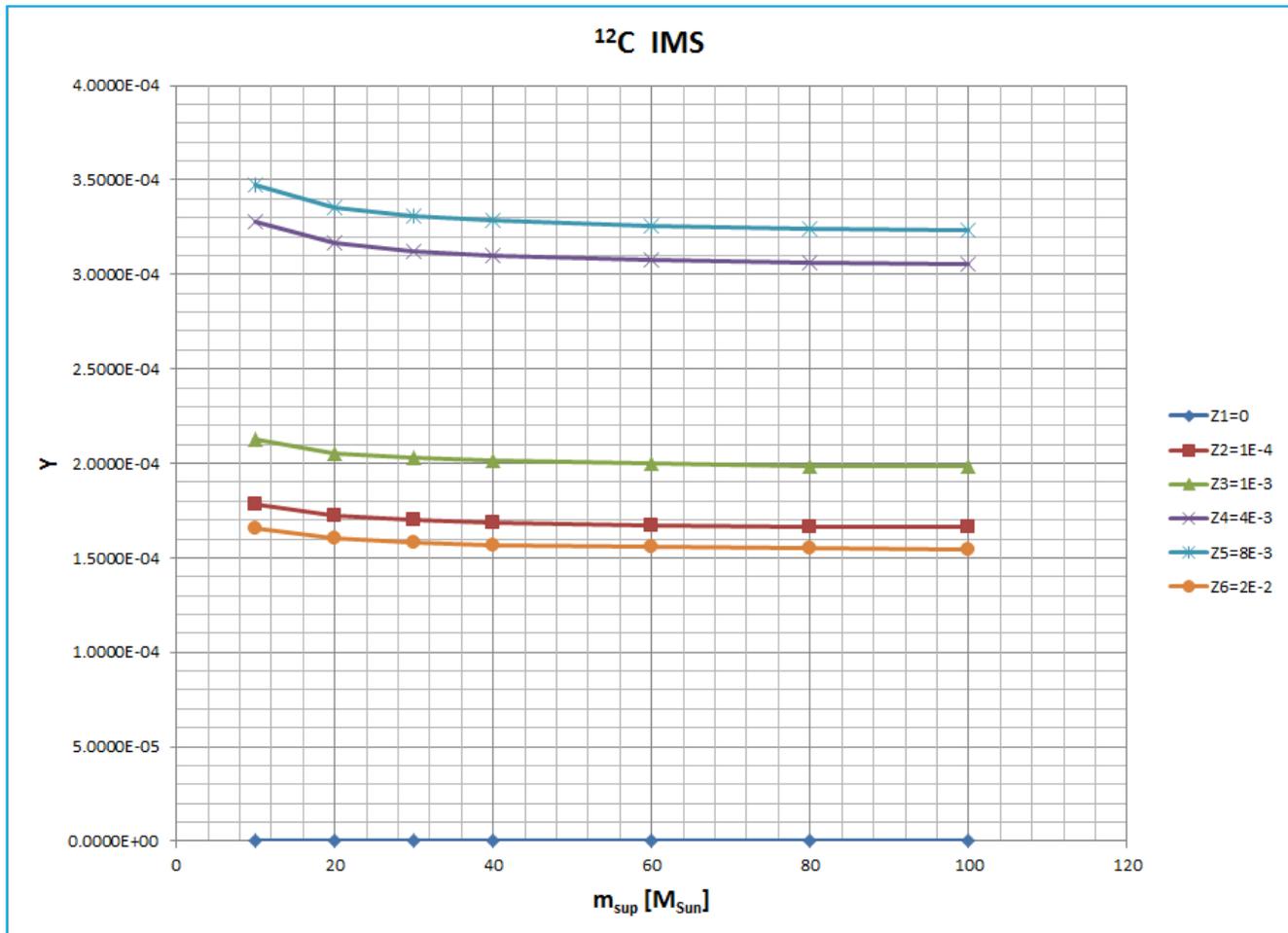


Figura A.14: Gráfica Y_i vs m de ^{12}C para IMS)

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	3.1627E-03	4.5554E-04	1.2186E-04	9.3559E-05	8.8063E-05	8.2402E-05
20	3.6839E-03	1.6801E-03	3.6651E-04	2.8798E-04	2.6563E-04	2.4313E-04
30	4.0599E-03	2.3027E-03	4.5294E-04	3.4681E-04	3.6071E-04	3.7446E-04
40	4.2106E-03	2.6594E-03	4.7155E-04	4.0403E-04	5.6656E-04	7.2892E-04
60	4.3546E-03	3.0430E-03	4.8150E-04	4.8956E-04	8.8587E-04	1.2820E-03
80	4.4250E-03	3.2473E-03	4.8684E-04	5.3511E-04	1.0558E-03	1.5764E-03
100	4.4707E-03	3.3866E-03	4.9046E-04	5.6617E-04	1.1718E-03	1.7772E-03

Tabla A.15: Y_i de ^{12}C para MS

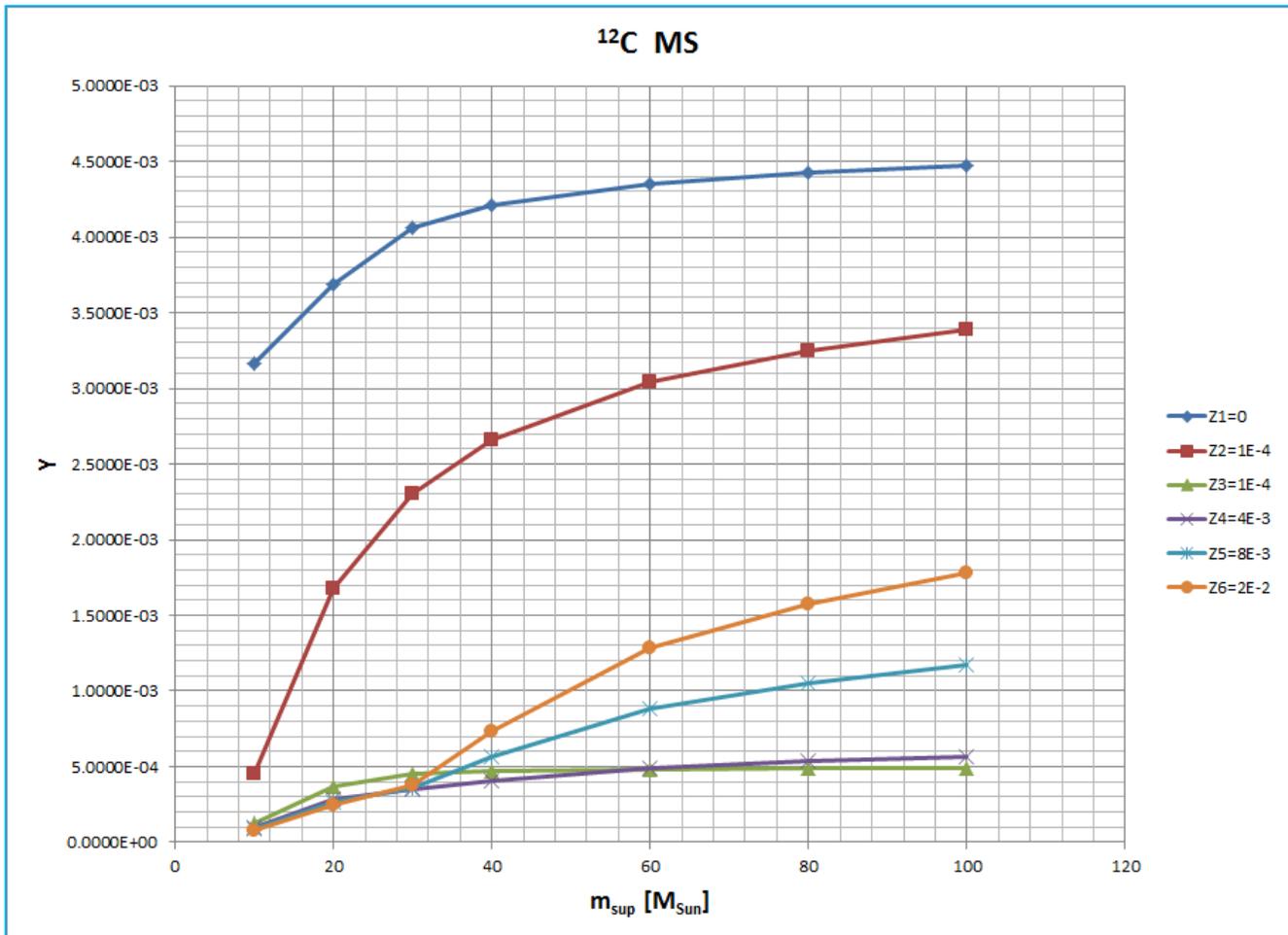


Figura A.15: Gráfica Y_i vs m de ^{12}C para MS (valor de Z_1 dividido entre 10)

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	3.1627E-03	3.0006E-03	2.3799E-03	1.3949E-03	1.0330E-03	2.5422E-04
20	3.6839E-03	4.1383E-03	2.5475E-03	1.5449E-03	1.1783E-03	4.0908E-04
30	4.0599E-03	4.7278E-03	2.6045E-03	1.5868E-03	1.2611E-03	5.3817E-04
40	4.2106E-03	5.0671E-03	2.6077E-03	1.6352E-03	1.4605E-03	8.9145E-04
60	4.3546E-03	5.4309E-03	2.6001E-03	1.7106E-03	1.7725E-03	1.4432E-03
80	4.4250E-03	5.6250E-03	2.5963E-03	1.7509E-03	1.9386E-03	1.7369E-03
100	4.4707E-03	5.7572E-03	2.5936E-03	1.7783E-03	2.0519E-03	1.9373E-03

Tabla A.16: Y_i de ^{12}C para ALL

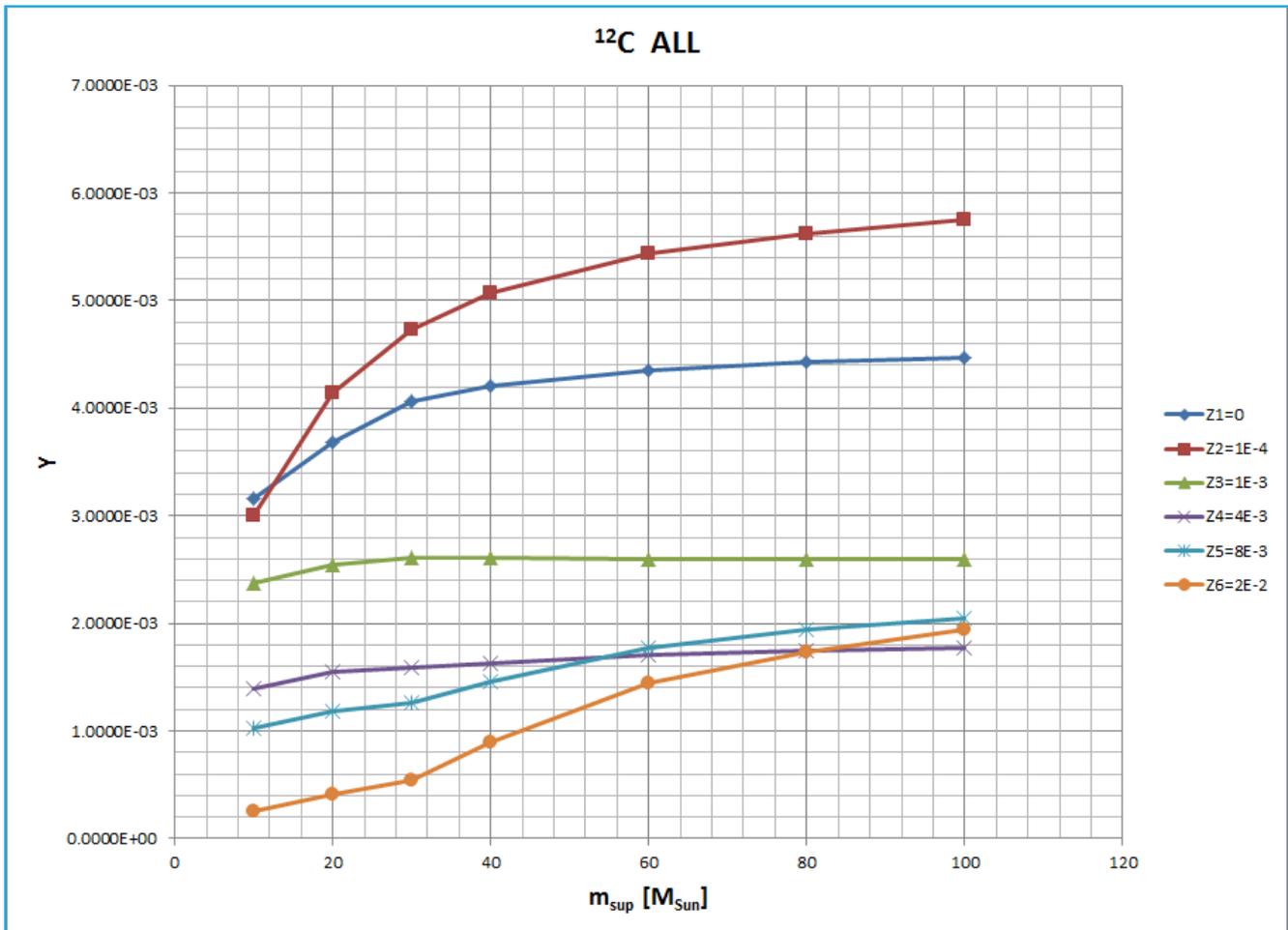


Figura A.16: Gráfica Y_i vs m de ^{12}C para ALL (valor de Z_1 dividido entre 10)

^{14}N

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	0.0000E+00	5.4303E-06	1.2425E-05	3.5735E-05	6.7546E-05	1.4760E-04
20	0.0000E+00	5.2449E-06	1.2001E-05	3.4516E-05	6.5240E-05	1.4256E-04
30	0.0000E+00	5.1742E-06	1.1839E-05	3.4050E-05	6.4360E-05	1.4064E-04
40	0.0000E+00	5.1371E-06	1.1754E-05	3.3806E-05	6.3899E-05	1.3963E-04
60	0.0000E+00	5.0950E-06	1.1658E-05	3.3529E-05	6.3375E-05	1.3849E-04
80	0.0000E+00	5.0731E-06	1.1608E-05	3.3385E-05	6.3103E-05	1.3789E-04
100	0.0000E+00	5.0579E-06	1.1573E-05	3.3285E-05	6.2914E-05	1.3748E-04

Tabla A.17: Y_i de ^{14}N para LMS

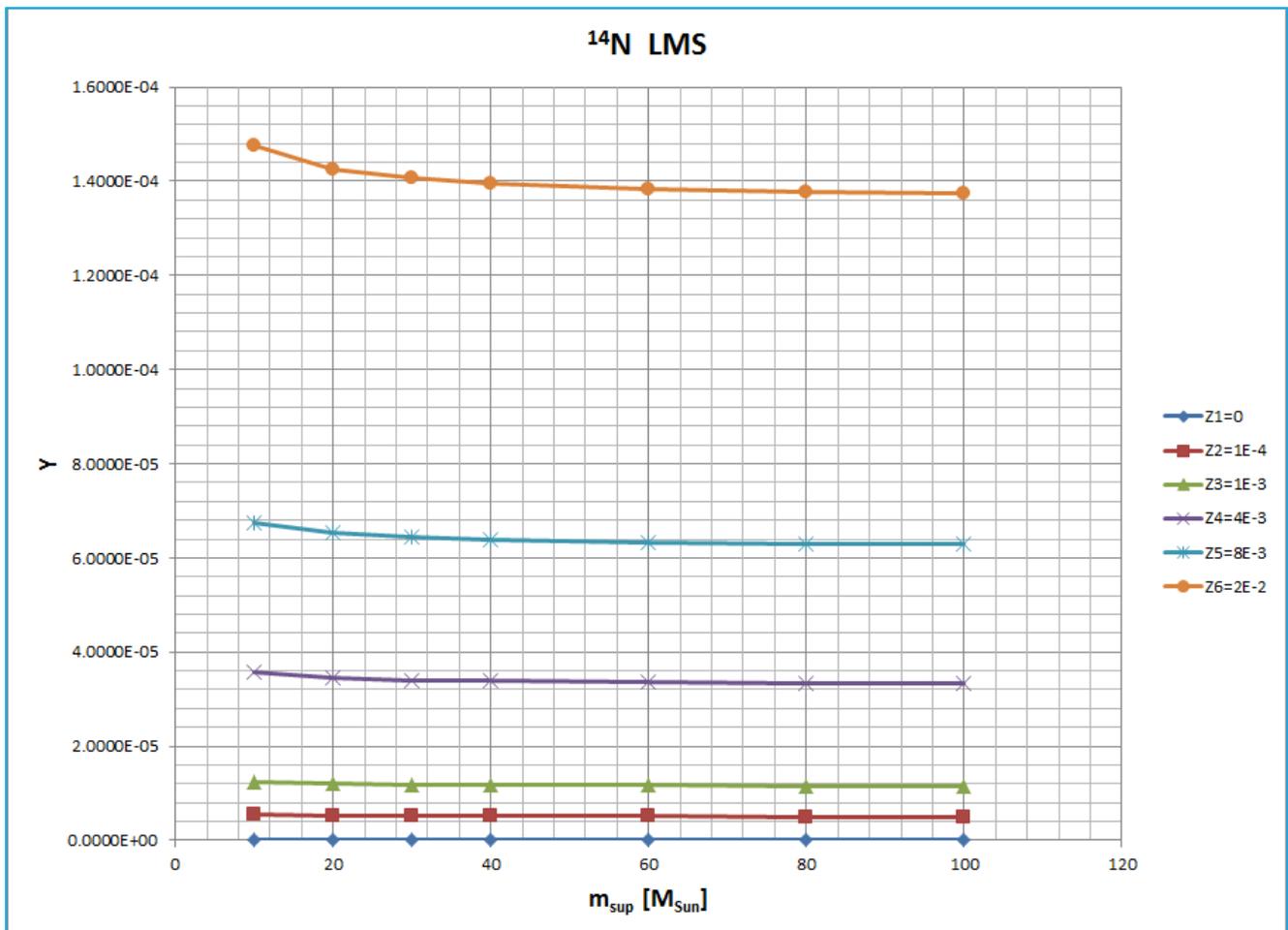


Figura A.17: Gráfica Y_i vs m de ^{14}N para LMS

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	0.0000E+00	5.1685E-04	5.5490E-04	6.8192E-04	5.3490E-04	3.2073E-04
20	0.0000E+00	4.9921E-04	5.3596E-04	6.5865E-04	5.1664E-04	3.0979E-04
30	0.0000E+00	4.9248E-04	5.2873E-04	6.4976E-04	5.0967E-04	3.0561E-04
40	0.0000E+00	4.8895E-04	5.2494E-04	6.4511E-04	5.0602E-04	3.0342E-04
60	0.0000E+00	4.8494E-04	5.2064E-04	6.3982E-04	5.0187E-04	3.0093E-04
80	0.0000E+00	4.8286E-04	5.1840E-04	6.3707E-04	4.9971E-04	2.9964E-04
100	0.0000E+00	4.8141E-04	5.1685E-04	6.3517E-04	4.9822E-04	2.9874E-04

Tabla A.18: Y_i de ^{14}N para IMS

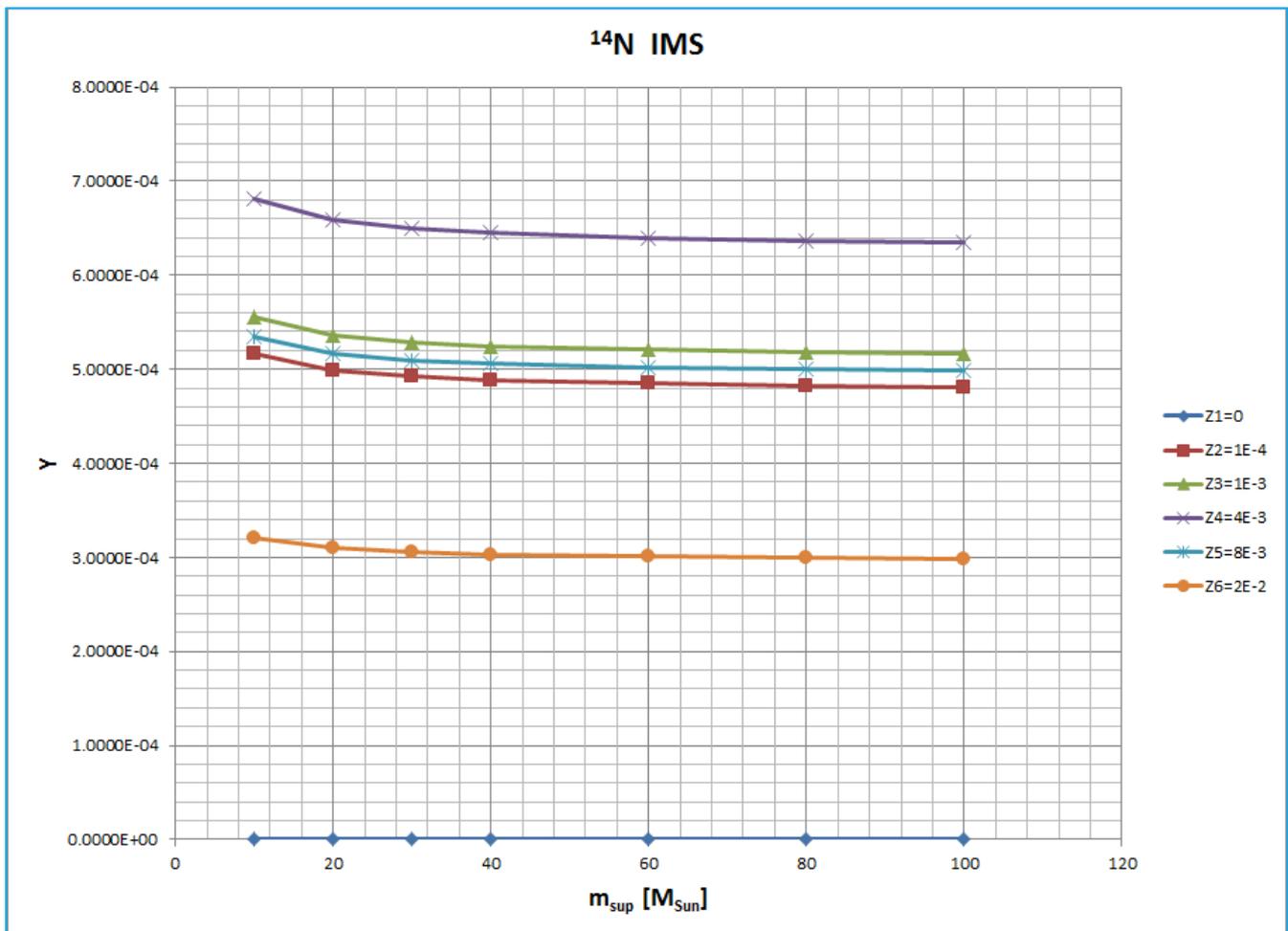


Figura A.18: Gráfica Y_i vs m de ^{14}N para IMS

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	1.8473E-04	2.7914E-05	1.0957E-05	9.2041E-06	2.6645E-05	4.3943E-05
20	2.0886E-04	9.6709E-05	2.6562E-05	4.7674E-05	9.5575E-05	1.4338E-04
30	2.4054E-04	1.3776E-04	3.1163E-05	5.8163E-05	1.2491E-04	1.9155E-04
40	2.6103E-04	1.6626E-04	3.2145E-05	6.1338E-05	1.4452E-04	2.2758E-04
60	2.8312E-04	1.9911E-04	3.3240E-05	6.4707E-05	1.6485E-04	2.6490E-04
80	2.9375E-04	2.1661E-04	3.3826E-05	6.6505E-05	1.7569E-04	2.8478E-04
100	3.0035E-04	2.2854E-04	3.4224E-05	6.7730E-05	1.8308E-04	2.9834E-04

Tabla A.19: Y_i de ^{14}N para MS

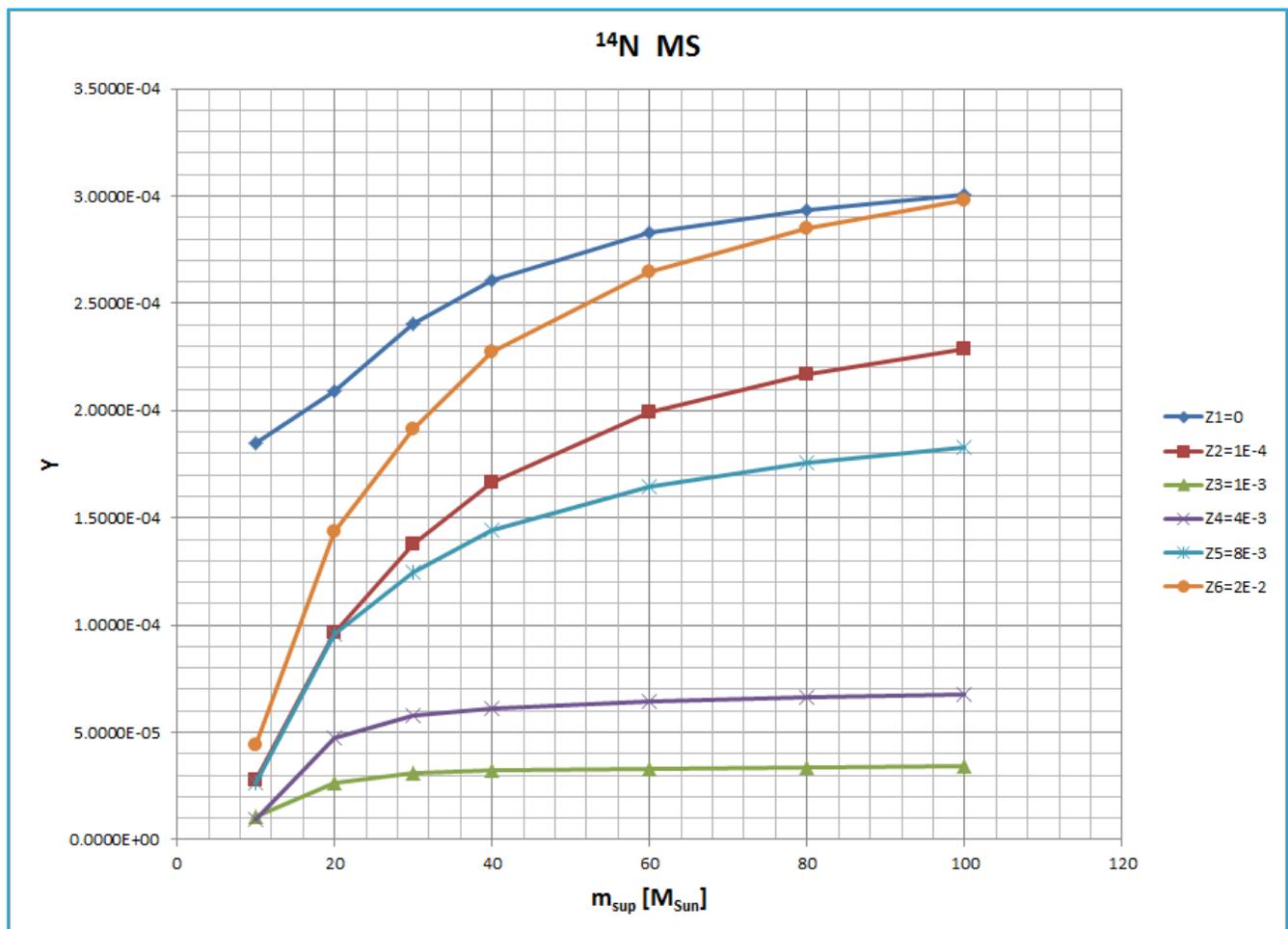


Figura A.19: Gráfica Y_i vs m de ^{14}N para MS (valor de Z_1 dividido entre 10)

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	1.8473E-04	5.5020E-04	5.7828E-04	7.2686E-04	6.2909E-04	5.1228E-04
20	2.0886E-04	6.0117E-04	5.7453E-04	7.4084E-04	6.7746E-04	5.9572E-04
30	2.4054E-04	6.3541E-04	5.7173E-04	7.4198E-04	6.9895E-04	6.3779E-04
40	2.6103E-04	6.6035E-04	5.6884E-04	7.4025E-04	7.1444E-04	6.7063E-04
60	2.8312E-04	6.8915E-04	5.6554E-04	7.3806E-04	7.3010E-04	7.0432E-04
80	2.9375E-04	7.0454E-04	5.6383E-04	7.3696E-04	7.3851E-04	7.2231E-04
100	3.0035E-04	7.1501E-04	5.6265E-04	7.3618E-04	7.4421E-04	7.3456E-04

Tabla A.20: Y_i de ^{14}N para ALL

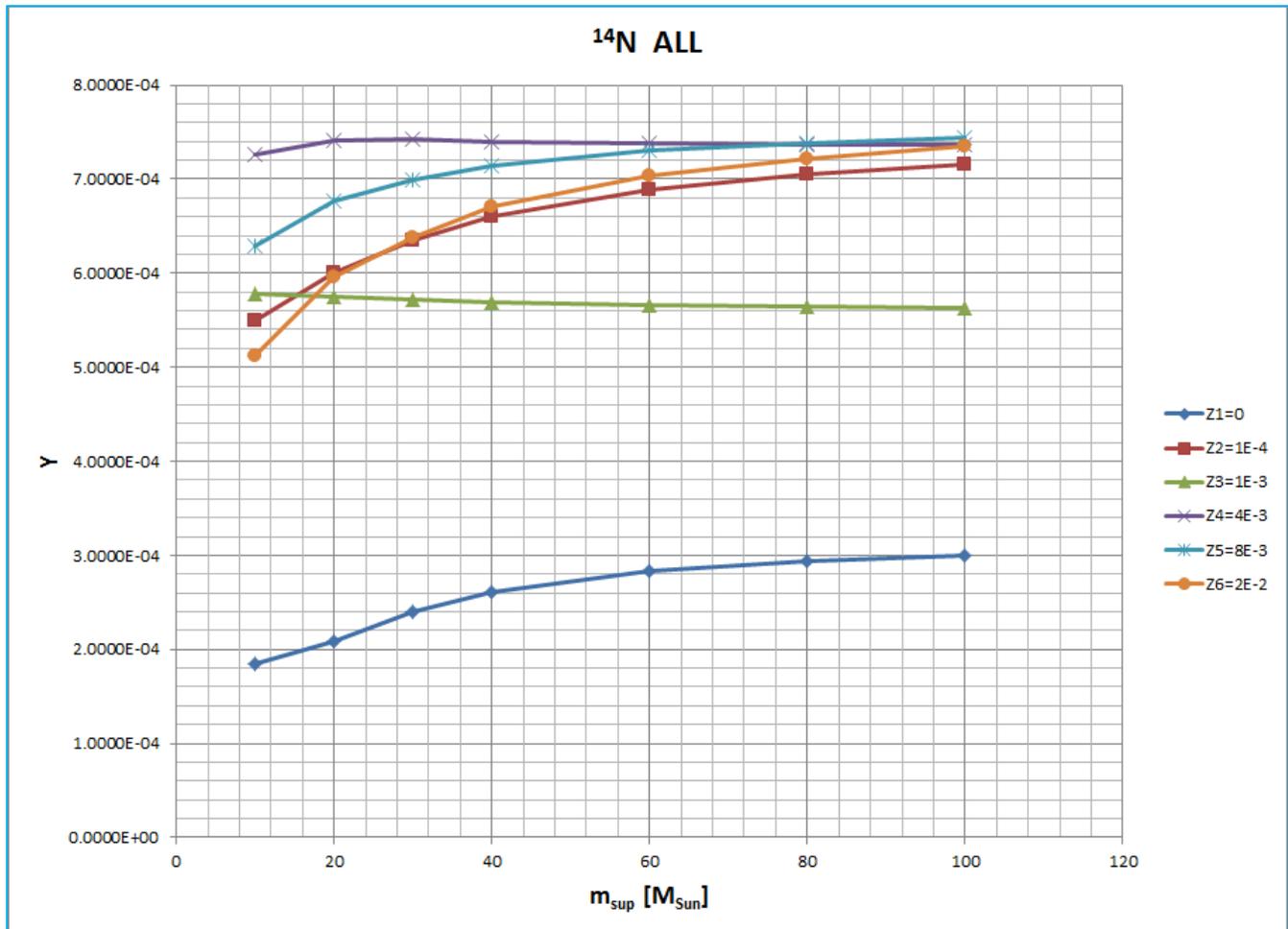


Figura A.20: Gráfica Y_i vs m de ^{14}N para ALL (valor de Z_1 dividido entre 10)

^{16}O

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	0.0000E+00	4.0517E-05	3.2710E-05	6.6901E-06	-4.3044E-06	-1.1613E-05
20	0.0000E+00	3.9135E-05	3.1594E-05	6.4618E-06	-4.1575E-06	-1.1217E-05
30	0.0000E+00	3.8607E-05	3.1167E-05	6.3746E-06	-4.1014E-06	-1.1066E-05
40	0.0000E+00	3.8330E-05	3.0944E-05	6.3289E-06	-4.0720E-06	-1.0986E-05
60	0.0000E+00	3.8016E-05	3.0690E-05	6.2770E-06	-4.0386E-06	-1.0896E-05
80	0.0000E+00	3.7852E-05	3.0558E-05	6.2501E-06	-4.0212E-06	-1.0850E-05
100	0.0000E+00	3.7739E-05	3.0467E-05	6.2314E-06	-4.0092E-06	-1.0817E-05

Tabla A.21: Y_i de ^{16}O para LMS

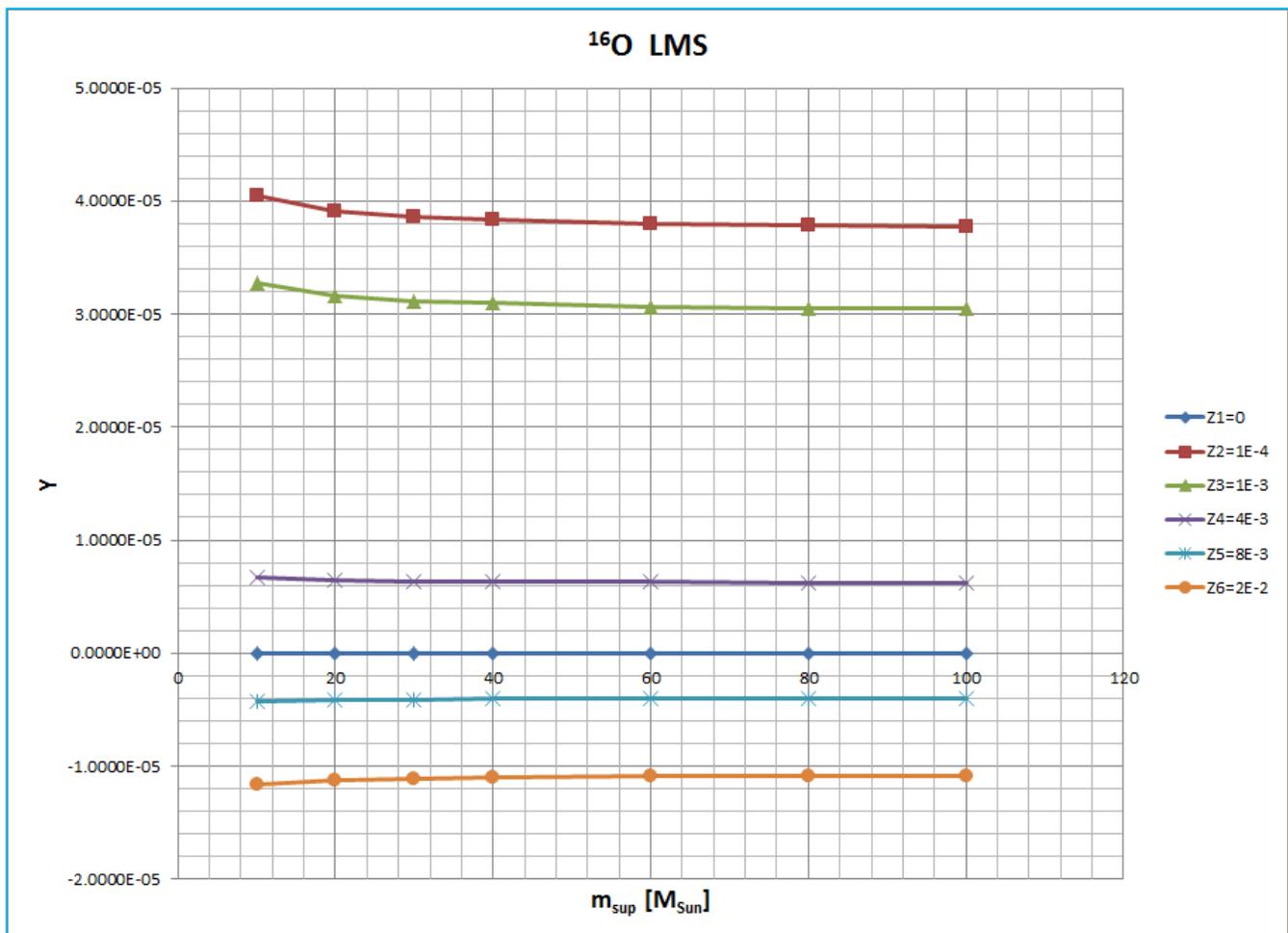


Figura A.21: Gráfica Y_i vs m de ^{16}O para LMS

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	0.0000E+00	1.2401E-05	3.5604E-07	-3.9787E-05	-6.1672E-05	-8.1524E-05
20	0.0000E+00	1.1978E-05	3.4385E-07	-3.8429E-05	-5.9567E-05	-7.8742E-05
30	0.0000E+00	1.1816E-05	3.3923E-07	-3.7910E-05	-5.8764E-05	-7.7679E-05
40	0.0000E+00	1.1731E-05	3.3679E-07	-3.7639E-05	-5.8343E-05	-7.7123E-05
60	0.0000E+00	1.1635E-05	3.3404E-07	-3.7330E-05	-5.7864E-05	-7.6491E-05
80	0.0000E+00	1.1585E-05	3.3259E-07	-3.7170E-05	-5.7615E-05	-7.6162E-05
100	0.0000E+00	1.1550E-05	3.3158E-07	-3.7059E-05	-5.7443E-05	-7.5934E-05

Tabla A.22: Y_i de ^{16}O para IMS

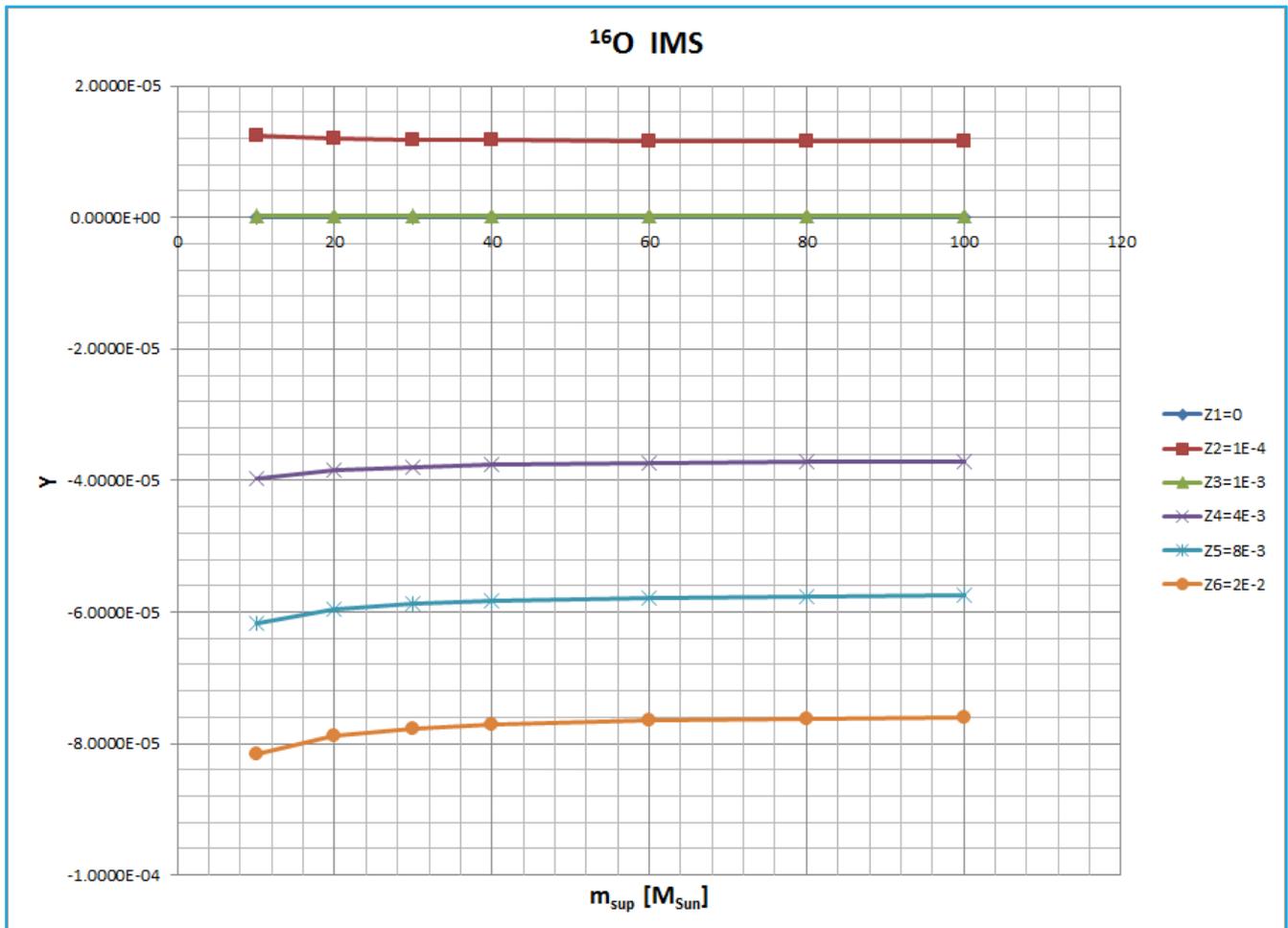


Figura A.22: Gráfica Y_i vs m de ^{16}O para IMS

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	7.2829E-03	1.0772E-03	5.7707E-04	4.1992E-04	2.7175E-04	1.2375E-04
20	8.9583E-03	4.1836E-03	1.7742E-03	1.3225E-03	9.5285E-04	5.8352E-04
30	1.1651E-02	6.8421E-03	3.6403E-03	2.4590E-03	2.0202E-03	1.5819E-03
40	1.3751E-02	9.0651E-03	5.0470E-03	3.7564E-03	3.2113E-03	2.6670E-03
60	1.6099E-02	1.1767E-02	6.6950E-03	5.3236E-03	4.7740E-03	4.2253E-03
80	1.7222E-02	1.3205E-02	7.5725E-03	6.1579E-03	5.6059E-03	5.0548E-03
100	1.7909E-02	1.4186E-02	8.1709E-03	6.7270E-03	6.1734E-03	5.6206E-03

Tabla A.23: Y_i de ^{16}O para MS

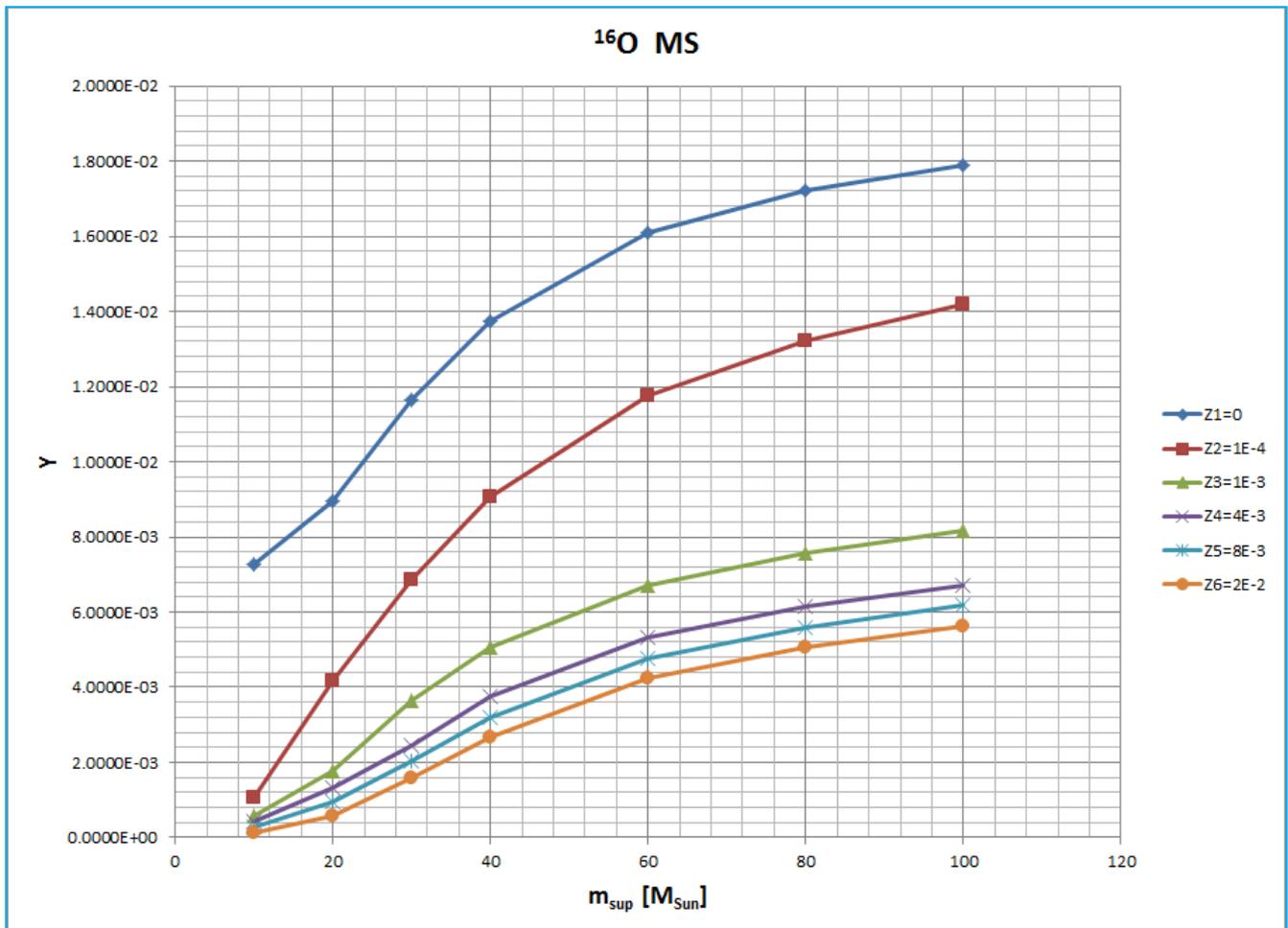


Figura A.23: Gráfica Y_i vs m de ^{16}O para MS (valor de Z_1 dividido entre 10)

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	7.2829E-03	1.1301E-03	6.1014E-04	3.8683E-04	2.0577E-04	3.0610E-05
20	8.9583E-03	4.2347E-03	1.8061E-03	1.2905E-03	8.8912E-04	4.9356E-04
30	1.1651E-02	6.8926E-03	3.6718E-03	2.4274E-03	1.9573E-03	1.4932E-03
40	1.3751E-02	9.1152E-03	5.0782E-03	3.7251E-03	3.1489E-03	2.5789E-03
60	1.6099E-02	1.1816E-02	6.7260E-03	5.2925E-03	4.7121E-03	4.1379E-03
80	1.7222E-02	1.3255E-02	7.6033E-03	6.1270E-03	5.5443E-03	4.9678E-03
100	1.7909E-02	1.4236E-02	8.2017E-03	6.6961E-03	6.1119E-03	5.5338E-03

Tabla A.24: Y_i de ^{16}O para ALL

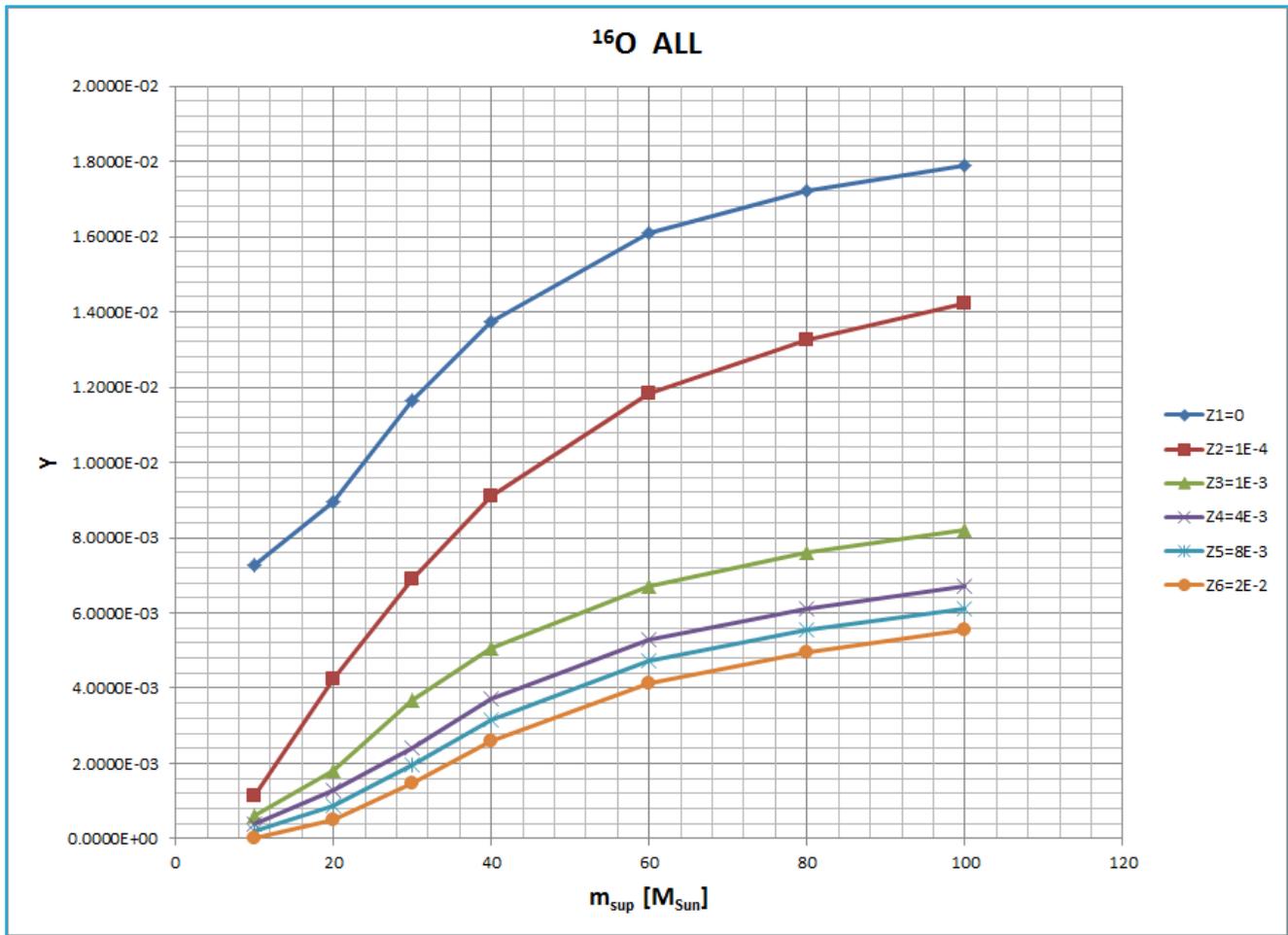


Figura A.24: Gráfica Y_i vs m de ^{16}O para ALL (valor de Z_1 dividido entre 10)

^{20}Ne

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	0.0000E+00	3.5683E-06	2.9091E-06	7.1269E-07	2.6858E-07	-2.5655E-08
20	0.0000E+00	3.4465E-06	2.8098E-06	6.8836E-07	2.5941E-07	-2.4779E-08
30	0.0000E+00	3.4000E-06	2.7719E-06	6.7908E-07	2.5591E-07	-2.4445E-08
40	0.0000E+00	3.3756E-06	2.7520E-06	6.7421E-07	2.5408E-07	-2.4270E-08
60	0.0000E+00	3.3479E-06	2.7295E-06	6.6868E-07	2.5199E-07	-2.4071E-08
80	0.0000E+00	3.3335E-06	2.7177E-06	6.6581E-07	2.5091E-07	-2.3967E-08
100	0.0000E+00	3.3236E-06	2.7096E-06	6.6382E-07	2.5016E-07	-2.3896E-08

Tabla A.25: Y_i de ^{20}Ne para LMS

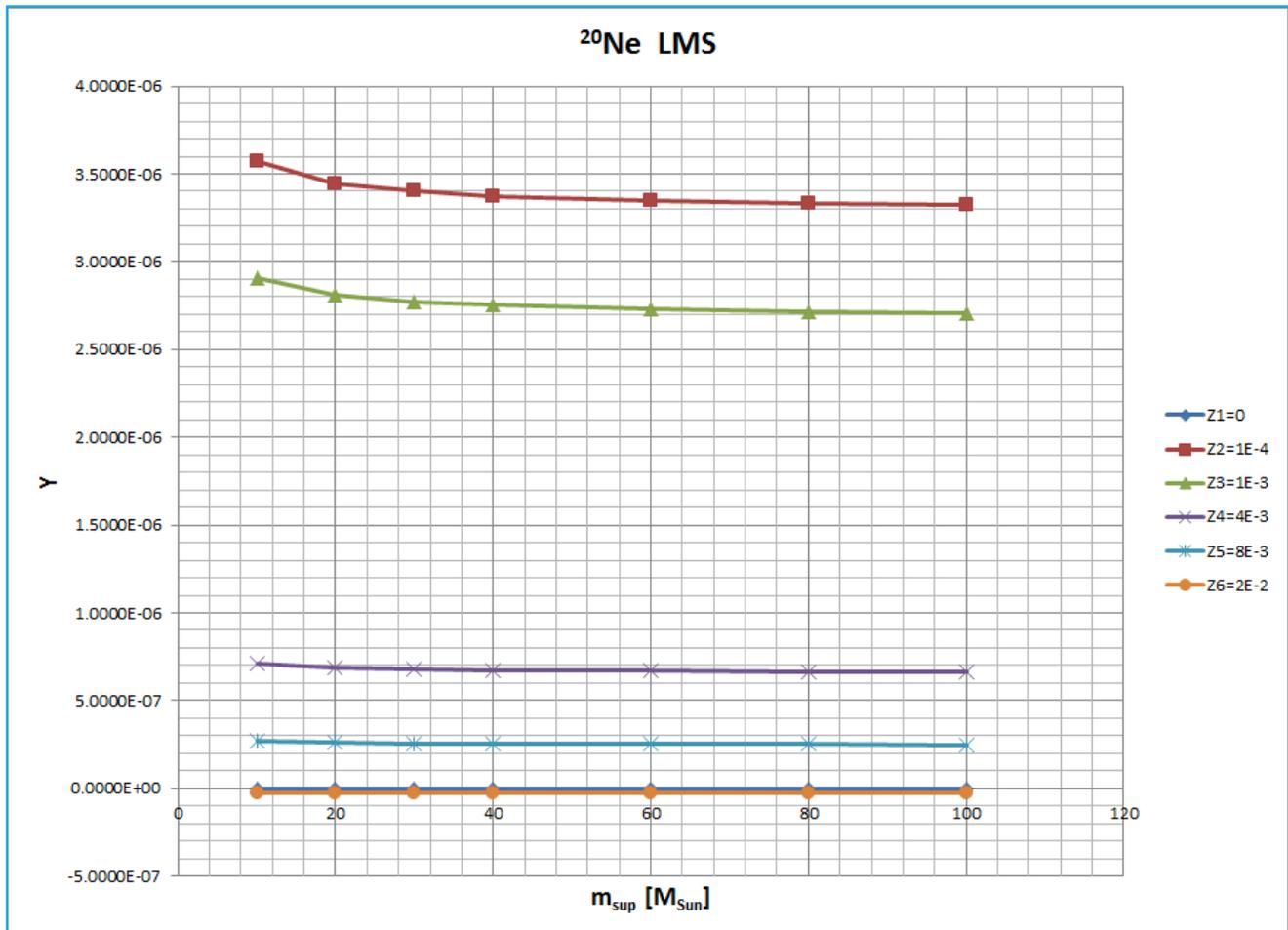


Figura A.25: Gráfica Y_i vs m de ^{20}Ne para LMS

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	0.0000E+00	7.5876E-07	7.4075E-07	6.8010E-07	4.2173E-07	-9.6326E-08
20	0.0000E+00	7.3287E-07	7.1547E-07	6.5688E-07	4.0733E-07	-9.3039E-08
30	0.0000E+00	7.2298E-07	7.0581E-07	6.4802E-07	4.0184E-07	-9.1784E-08
40	0.0000E+00	7.1780E-07	7.0076E-07	6.4338E-07	3.9896E-07	-9.1126E-08
60	0.0000E+00	7.1191E-07	6.9501E-07	6.3810E-07	3.9569E-07	-9.0379E-08
80	0.0000E+00	7.0885E-07	6.9202E-07	6.3536E-07	3.9399E-07	-8.9990E-08
100	0.0000E+00	7.0673E-07	6.8996E-07	6.3346E-07	3.9281E-07	-8.9722E-08

Tabla A.26: Y_i de ^{20}Ne para IMS

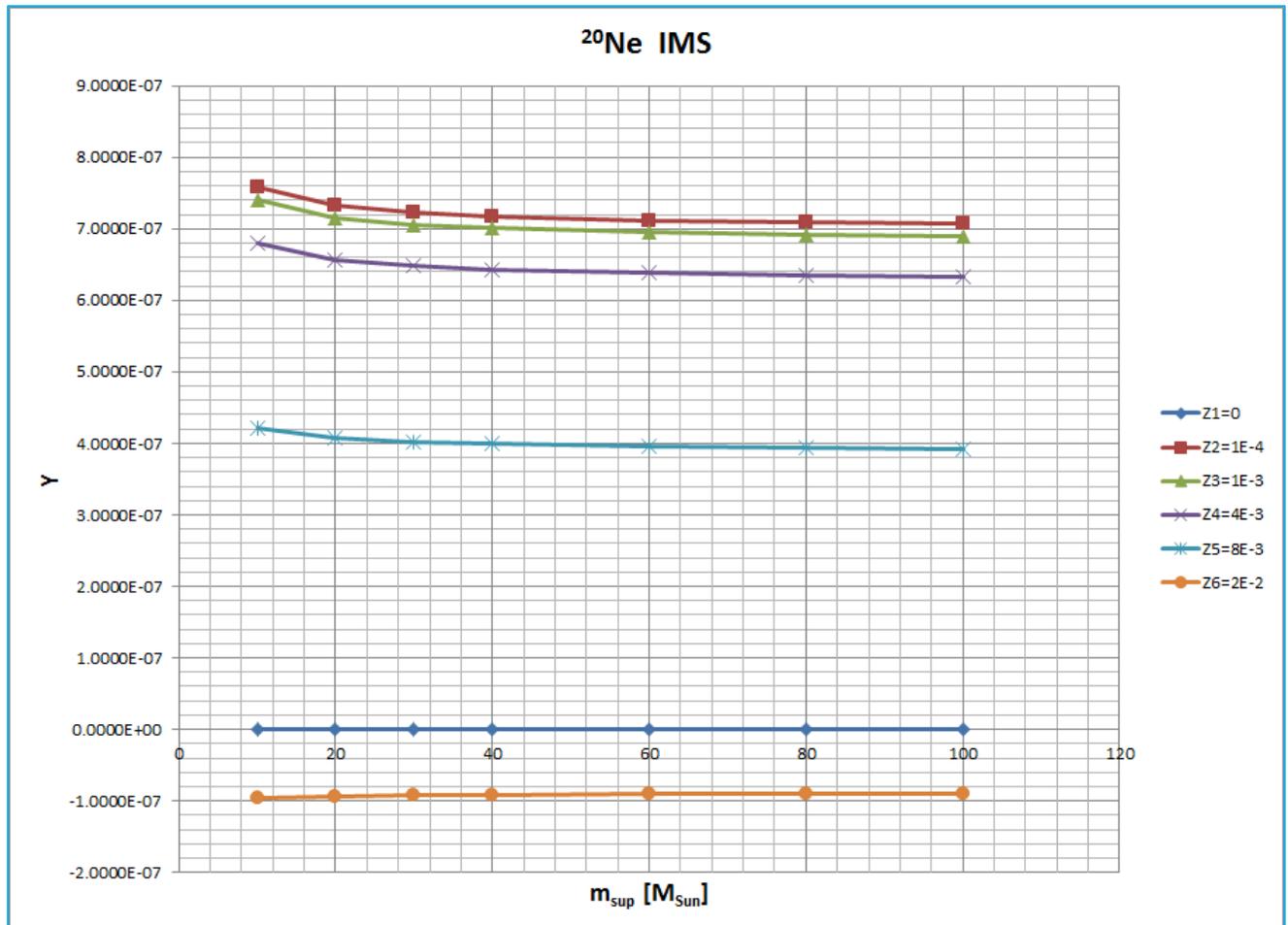


Figura A.26: Gráfica Y_i vs m de ^{20}Ne para IMS

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	1.1413E-04	2.3484E-05	7.5338E-05	1.4845E-04	8.3570E-05	1.8694E-05
20	9.0178E-04	4.4935E-04	3.8173E-04	4.8121E-04	3.0288E-04	1.2455E-04
30	1.3798E-03	8.6154E-04	9.4588E-04	8.2066E-04	6.5623E-04	4.9173E-04
40	1.4392E-03	1.0066E-03	1.1628E-03	1.0994E-03	9.5519E-04	8.1084E-04
60	1.3685E-03	1.0600E-03	1.2108E-03	1.4687E-03	1.3694E-03	1.2700E-03
80	1.3356E-03	1.0885E-03	1.2364E-03	1.6653E-03	1.5899E-03	1.5144E-03
100	1.3167E-03	1.1079E-03	1.2538E-03	1.7993E-03	1.7403E-03	1.6811E-03

Tabla A.27: Y_i de ^{20}Ne para MS

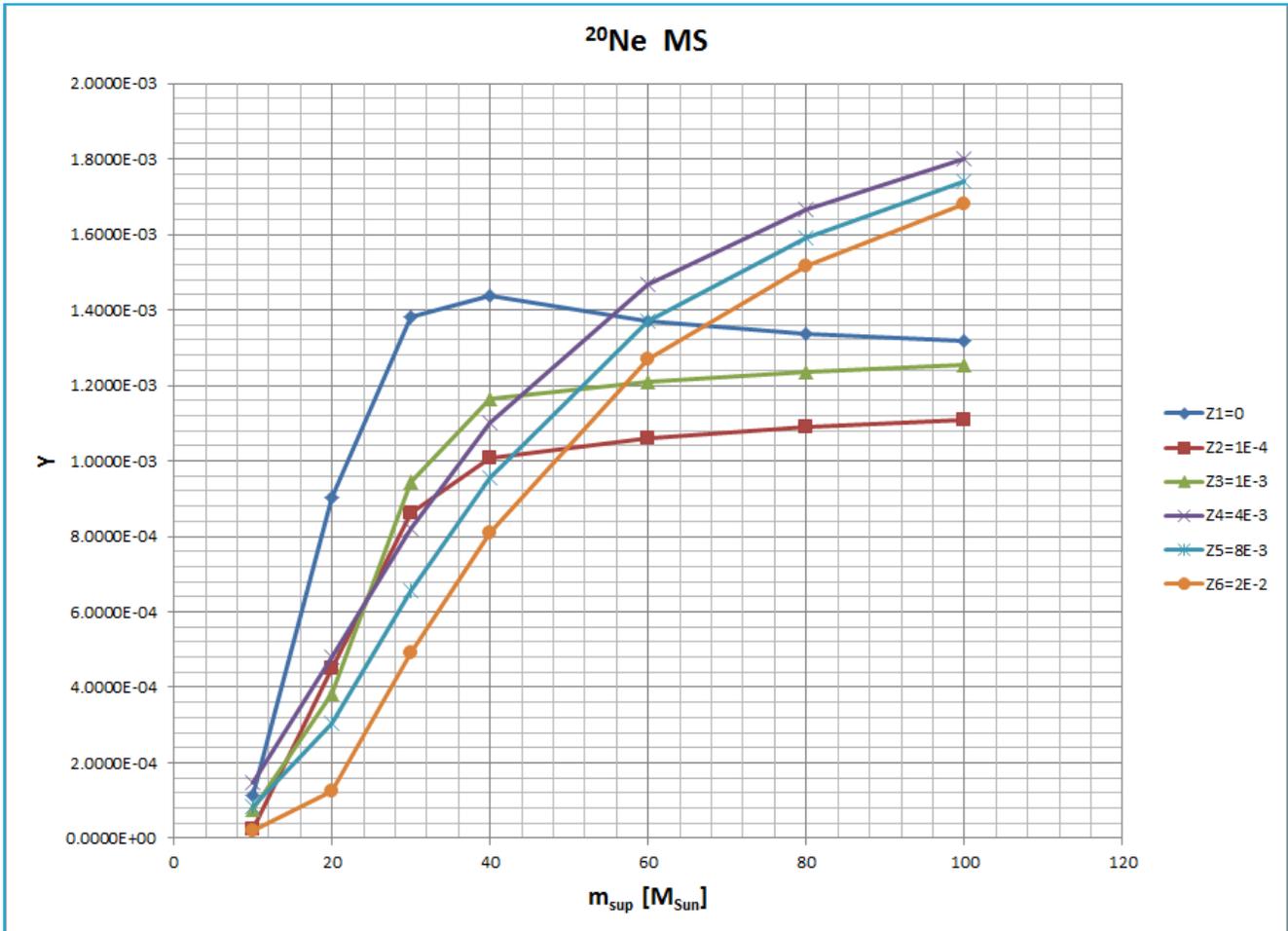


Figura A.27: Gráfica Y_i vs m de ^{20}Ne para MS (valor de Z_1 dividido entre 10)

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	1.1413E-04	2.7811E-05	7.8988E-05	1.4984E-04	8.4260E-05	1.8572E-05
20	9.0178E-04	4.5353E-04	3.8525E-04	4.8256E-04	3.0355E-04	1.2444E-04
30	1.3798E-03	8.6567E-04	9.4936E-04	8.2198E-04	6.5688E-04	4.9162E-04
40	1.4392E-03	1.0107E-03	1.1663E-03	1.1007E-03	9.5584E-04	8.1072E-04
60	1.3685E-03	1.0640E-03	1.2142E-03	1.4700E-03	1.3700E-03	1.2699E-03
80	1.3356E-03	1.0925E-03	1.2398E-03	1.6666E-03	1.5905E-03	1.5143E-03
100	1.3167E-03	1.1119E-03	1.2572E-03	1.8006E-03	1.7409E-03	1.6810E-03

Tabla A.28: Y_i de ^{20}Ne para ALL

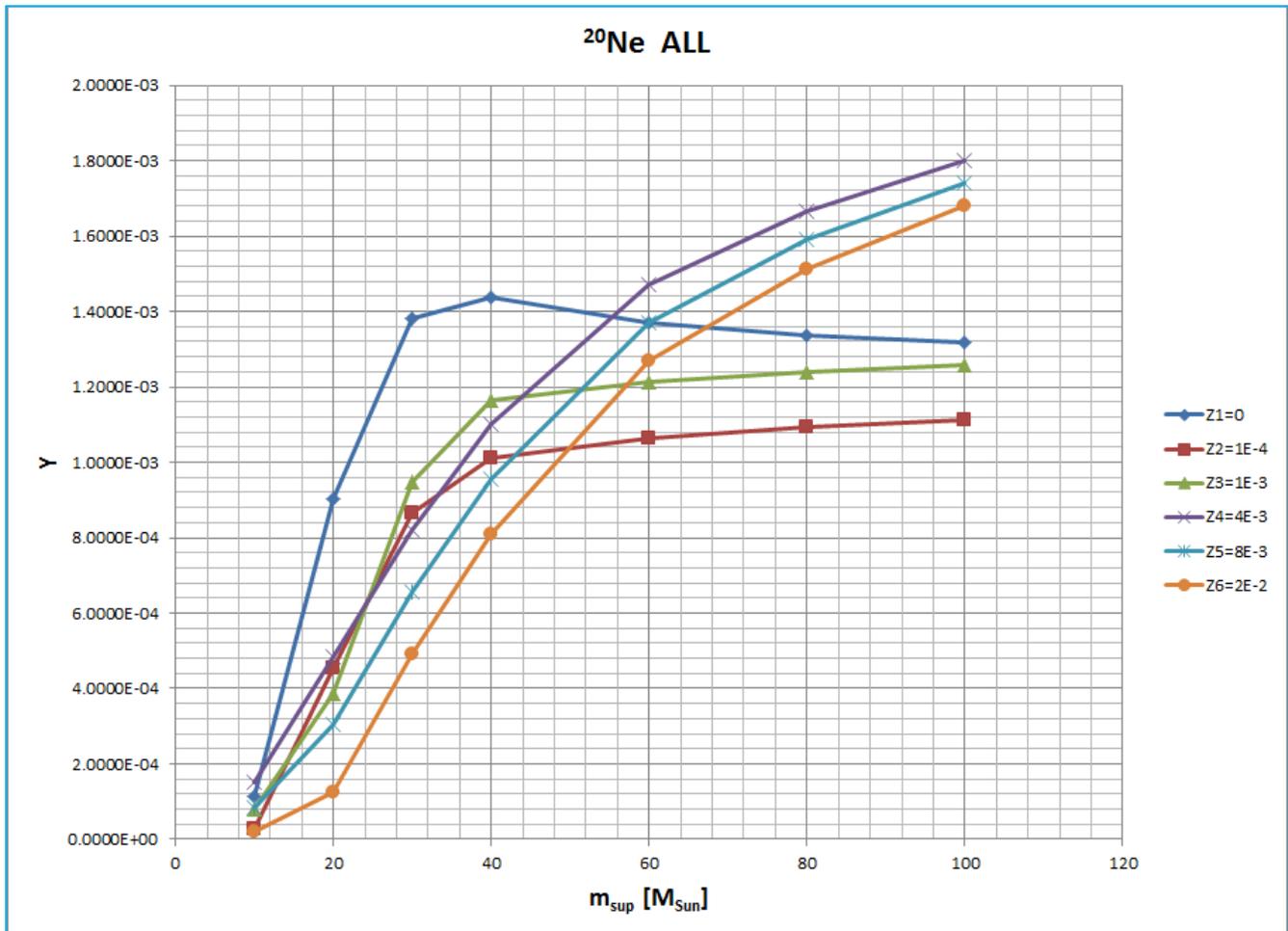


Figura A.28: Gráfica Y_i vs m de ^{20}Ne para ALL (valor de Z_1 dividido entre 10)

^{48}Ti

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	4.7199E-07	7.7172E-08	1.1063E-07	8.8838E-08	7.7217E-08	6.5597E-08
20	4.8440E-07	2.4700E-07	3.1647E-07	2.8509E-07	2.5533E-07	2.2556E-07
30	5.0209E-07	3.1754E-07	3.8407E-07	3.4258E-07	3.1333E-07	2.8405E-07
40	5.1291E-07	3.6055E-07	4.2480E-07	3.9214E-07	3.5952E-07	3.2687E-07
60	5.2375E-07	4.0727E-07	4.7173E-07	4.4064E-07	4.0273E-07	3.6477E-07
80	5.2914E-07	4.3217E-07	4.9674E-07	4.6649E-07	4.2576E-07	3.8497E-07
100	5.3279E-07	4.4914E-07	5.1379E-07	4.8411E-07	4.4146E-07	3.9873E-07

Tabla A.29: Y_i de ^{48}Ti para $MS = ALL$. Éste, al ser producido solo por las estrellas masivas tiene los mismos valores de Y_i para MS y para ALL .

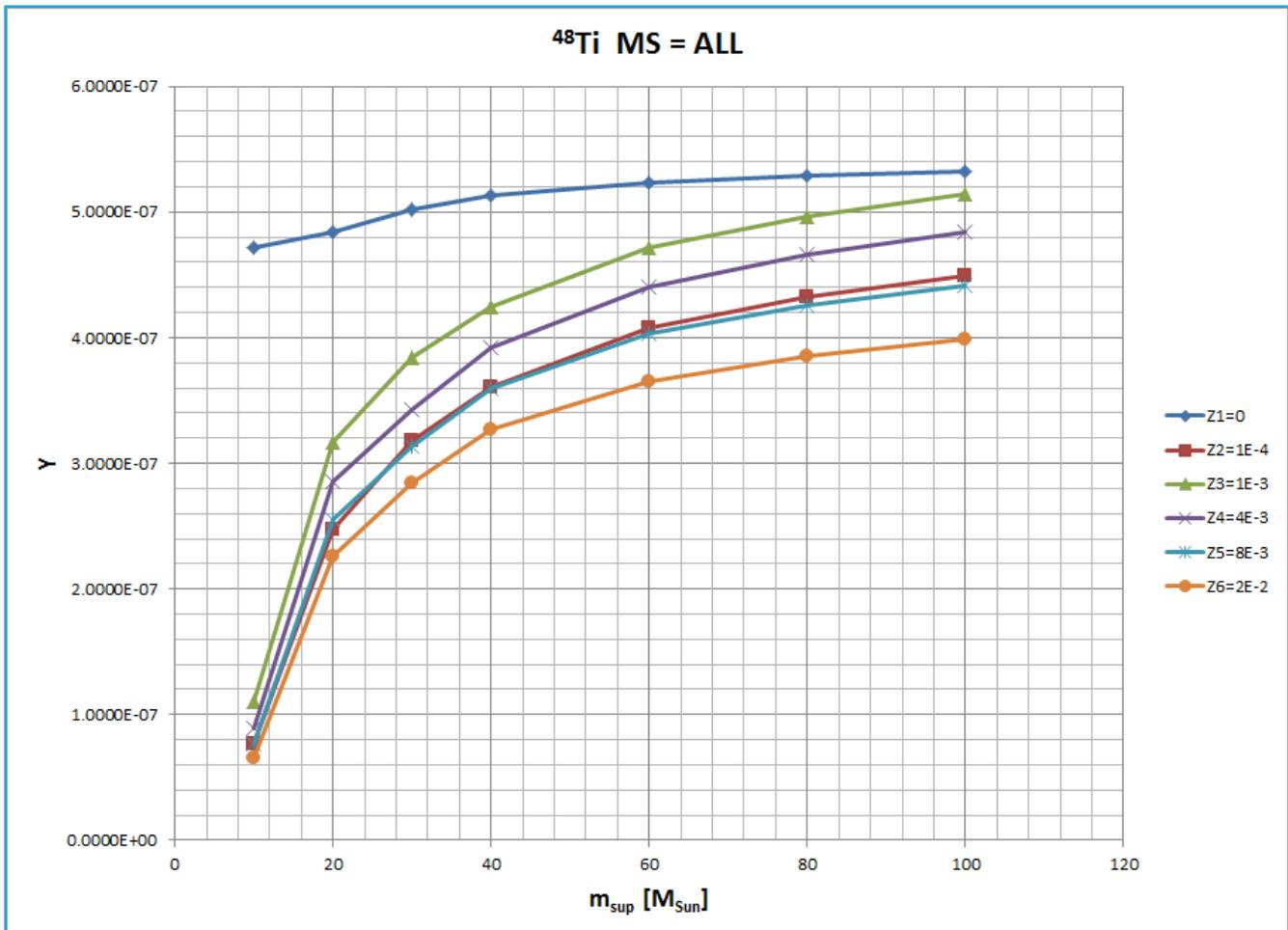


Figura A.29: Gráfica Y_i vs m de ^{48}Ti para $MS = ALL$ (valor de Z_1 dividido entre 10)

^{59}Co

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	0.0000E+00	4.0481E-09	9.7582E-09	2.8785E-08	2.0701E-08	5.2288E-09
20	0.0000E+00	3.9100E-09	9.4252E-09	2.7803E-08	1.9995E-08	5.0503E-09
30	0.0000E+00	3.8572E-09	9.2980E-09	2.7428E-08	1.9725E-08	4.9822E-09
40	0.0000E+00	3.8296E-09	9.2314E-09	2.7231E-08	1.9584E-08	4.9465E-09
60	0.0000E+00	3.7982E-09	9.1557E-09	2.7008E-08	1.9423E-08	4.9059E-09
80	0.0000E+00	3.7818E-09	9.1163E-09	2.6892E-08	1.9340E-08	4.8848E-09
100	0.0000E+00	3.7705E-09	9.0891E-09	2.6811E-08	1.9282E-08	4.8702E-09

Tabla A.30: Y_i de ^{59}Co para LMS

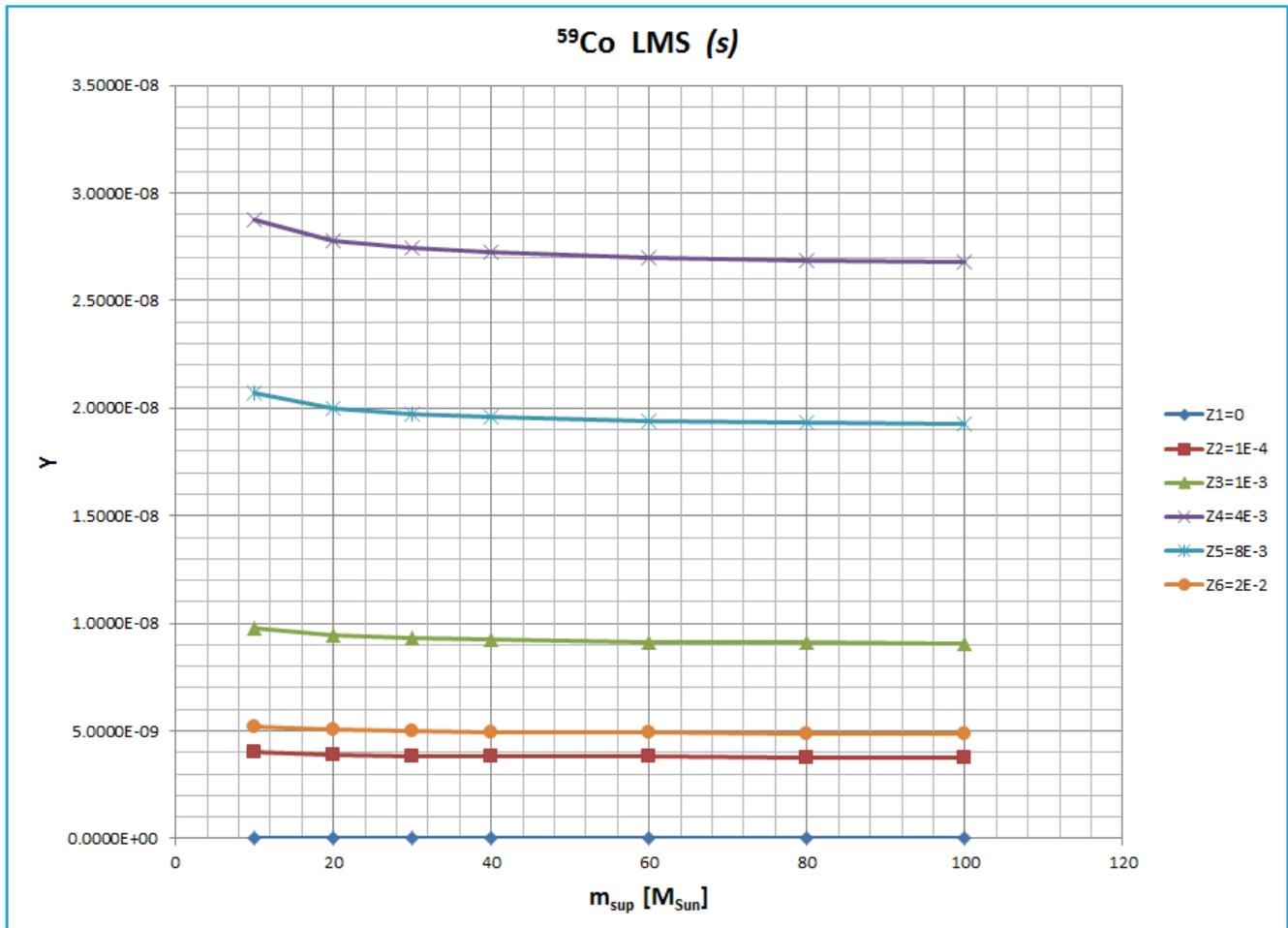


Figura A.30: Gráfica Y_i vs m de ^{59}Co para LMS

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	0.0000E+00	8.5836E-10	1.7998E-08	7.5111E-08	1.2086E-07	7.9649E-08
20	0.0000E+00	8.2907E-10	1.7384E-08	7.2548E-08	1.1674E-07	7.6930E-08
30	0.0000E+00	8.1788E-10	1.7149E-08	7.1569E-08	1.1516E-07	7.5892E-08
40	0.0000E+00	8.1202E-10	1.7026E-08	7.1056E-08	1.1434E-07	7.5349E-08
60	0.0000E+00	8.0536E-10	1.6887E-08	7.0473E-08	1.1340E-07	7.4731E-08
80	0.0000E+00	8.0190E-10	1.6814E-08	7.0170E-08	1.1291E-07	7.4410E-08
100	0.0000E+00	7.9950E-10	1.6764E-08	6.9961E-08	1.1258E-07	7.4187E-08

Tabla A.31: Y_i de ^{59}Co para IMS

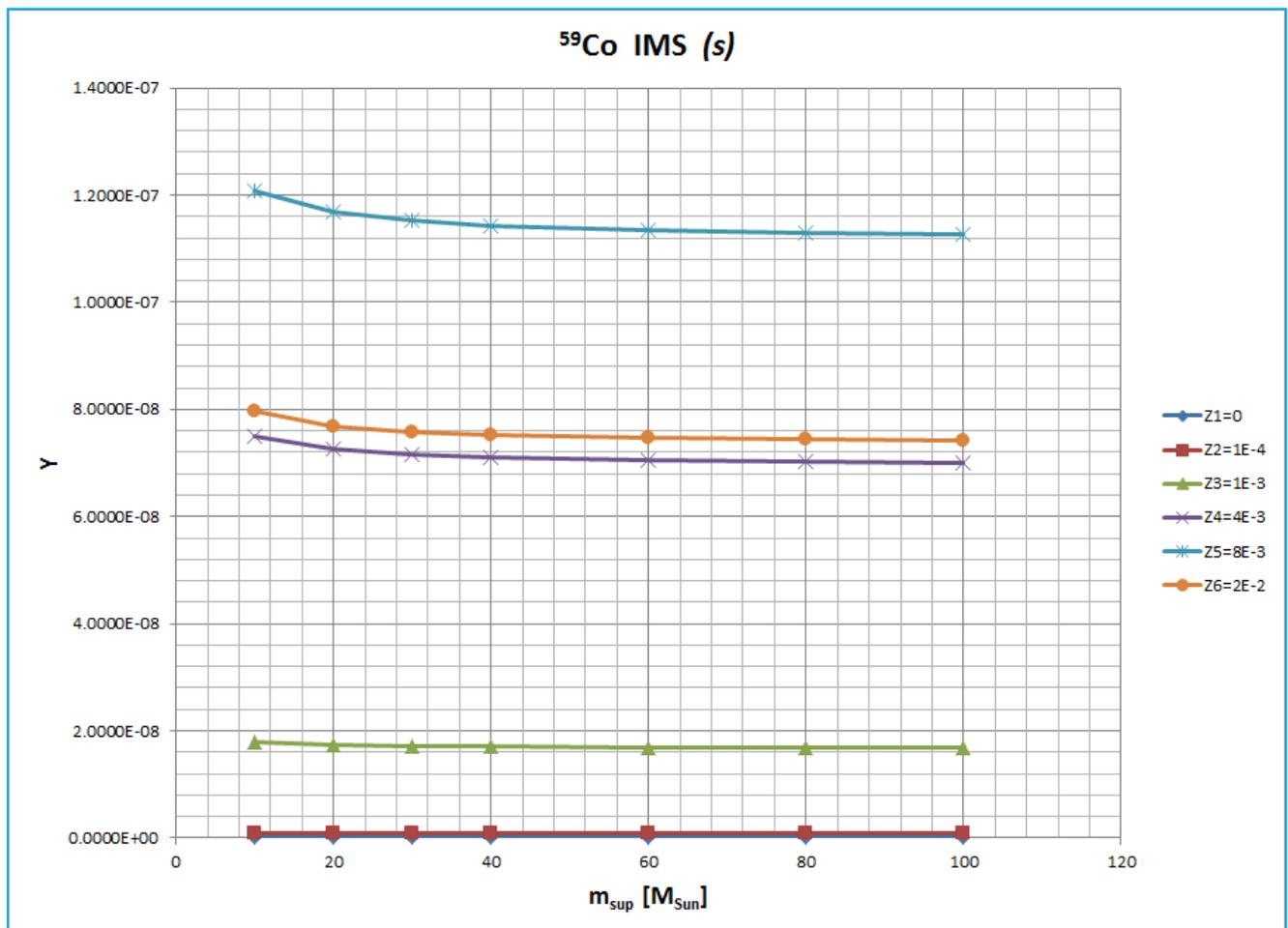


Figura A.31: Gráfica Y_i vs m de ^{59}Co para IMS

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	1.3057E-06	1.9357E-07	1.0093E-07	2.1804E-07	1.6846E-07	1.1888E-07
20	1.1875E-06	5.6467E-07	3.6563E-07	6.3561E-07	4.9402E-07	3.5250E-07
30	9.9379E-07	5.9185E-07	3.8510E-07	6.9950E-07	6.0904E-07	5.1865E-07
40	8.8801E-07	5.8906E-07	3.9234E-07	7.2416E-07	6.7762E-07	6.3112E-07
60	7.9453E-07	5.8535E-07	3.9685E-07	7.5265E-07	7.5271E-07	7.5282E-07
80	7.5049E-07	5.8343E-07	3.9929E-07	7.6789E-07	7.9274E-07	8.1764E-07
100	7.2462E-07	5.8209E-07	4.0094E-07	7.7825E-07	8.2002E-07	8.6183E-07

Tabla A.32: Y_i de ^{59}Co para MS

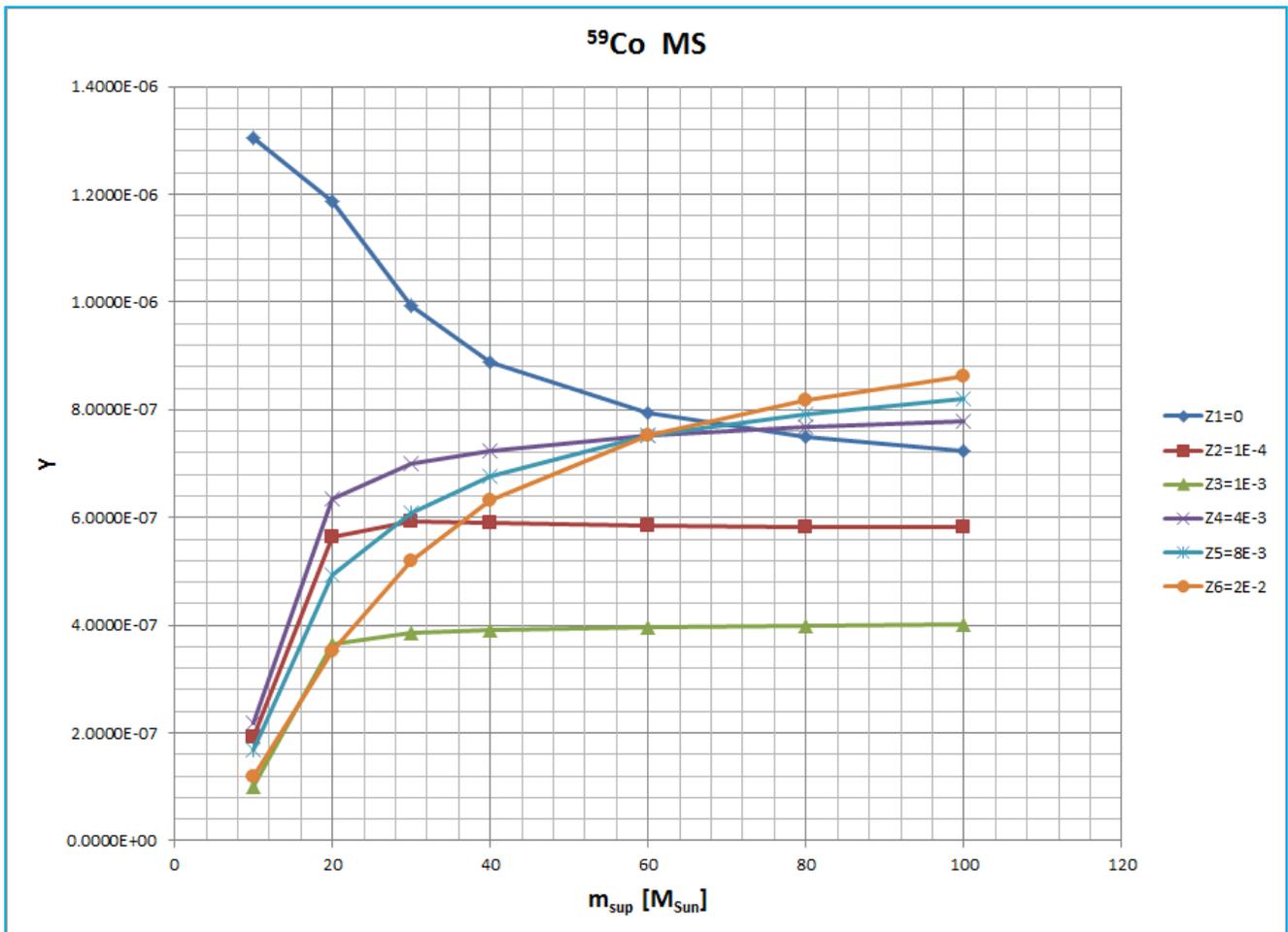


Figura A.32: Gráfica Y_i vs m de ^{59}Co para MS (valor de Z_1 dividido entre 10)

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	1.3057E-06	1.9848E-07	1.2869E-07	3.2194E-07	3.1003E-07	2.0376E-07
20	1.1875E-06	5.6941E-07	3.9244E-07	7.3596E-07	6.3075E-07	4.3448E-07
30	9.9379E-07	5.9653E-07	4.1155E-07	7.9849E-07	7.4393E-07	5.9952E-07
40	8.8801E-07	5.9370E-07	4.1860E-07	8.2245E-07	8.1154E-07	7.1142E-07
60	7.9453E-07	5.8995E-07	4.2289E-07	8.5014E-07	8.8554E-07	8.3246E-07
80	7.5049E-07	5.8801E-07	4.2522E-07	8.6495E-07	9.2499E-07	8.9693E-07
100	7.2462E-07	5.8666E-07	4.2679E-07	8.7502E-07	9.5188E-07	9.4089E-07

Tabla A.33: Y_i de ^{59}Co ALL

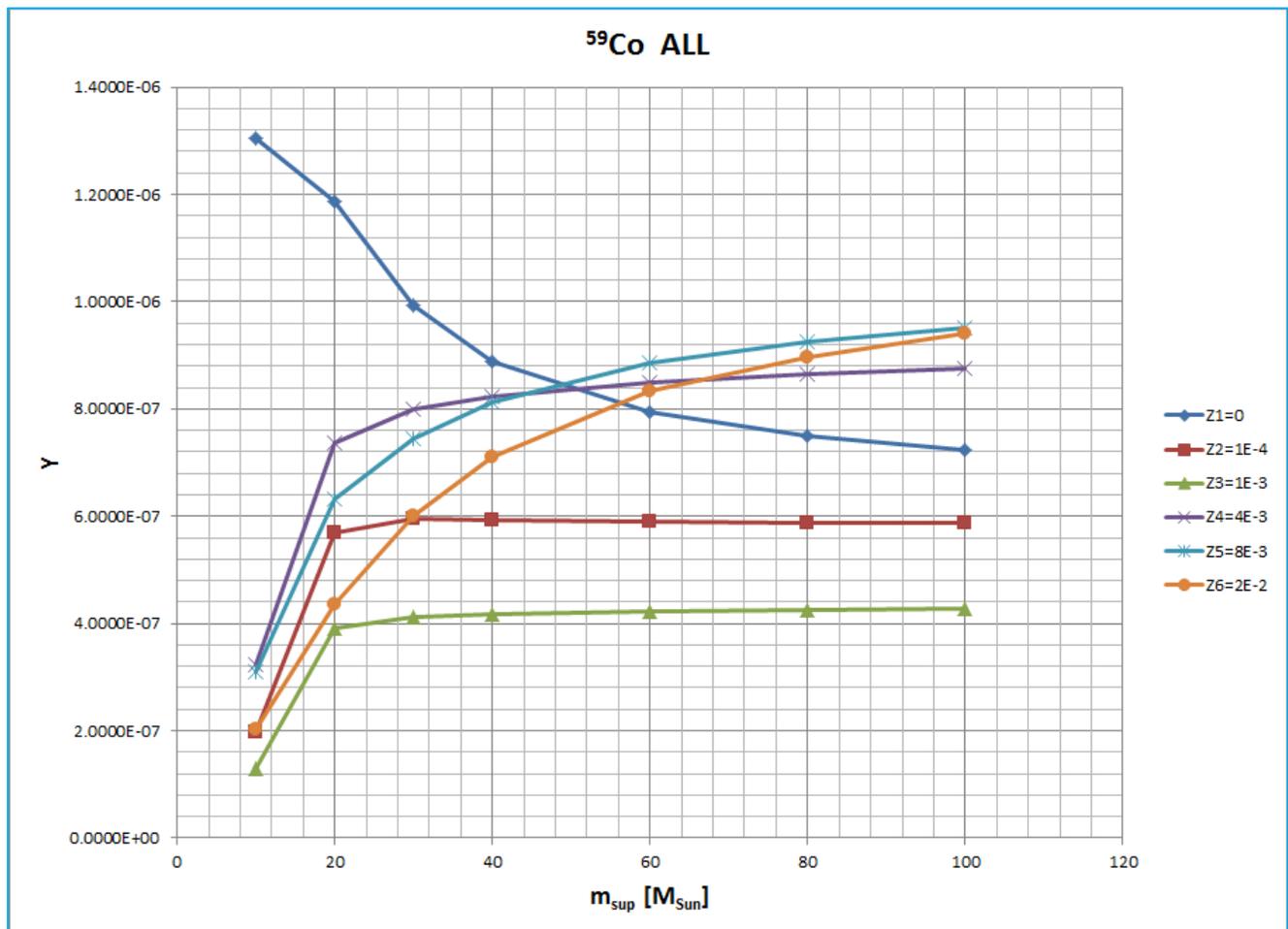


Figura A.33: Gráfica Y_i vs m de ^{59}Co para ALL (valor de Z_1 dividido entre 10)

⁷⁰Zn

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	5.1648E-17	2.5589E-11	2.5589E-10	9.3790E-11	1.0148E-09	1.9357E-09
20	4.9133E-16	5.7169E-11	5.7169E-10	5.7482E-10	2.6470E-09	4.7188E-09
30	6.7046E-16	5.7375E-11	5.7375E-10	6.3446E-10	3.8599E-09	7.0850E-09
40	6.3684E-16	5.8672E-11	5.8672E-10	7.2481E-10	4.9804E-09	9.2357E-09
60	5.7062E-16	6.0505E-11	6.0505E-10	8.1928E-10	7.6419E-09	1.4463E-08
80	5.3943E-16	6.1487E-11	6.1487E-10	8.6962E-10	9.0586E-09	1.7246E-08
100	5.2106E-16	6.2154E-11	6.2154E-10	9.0393E-10	1.0025E-08	1.9144E-08

Tabla A.34: Y_i de ⁷⁰Zn para $MS = ALL$. Éste, al ser producido solo por las estrellas masivas tiene los mismos valores de Y_i para MS y para ALL .

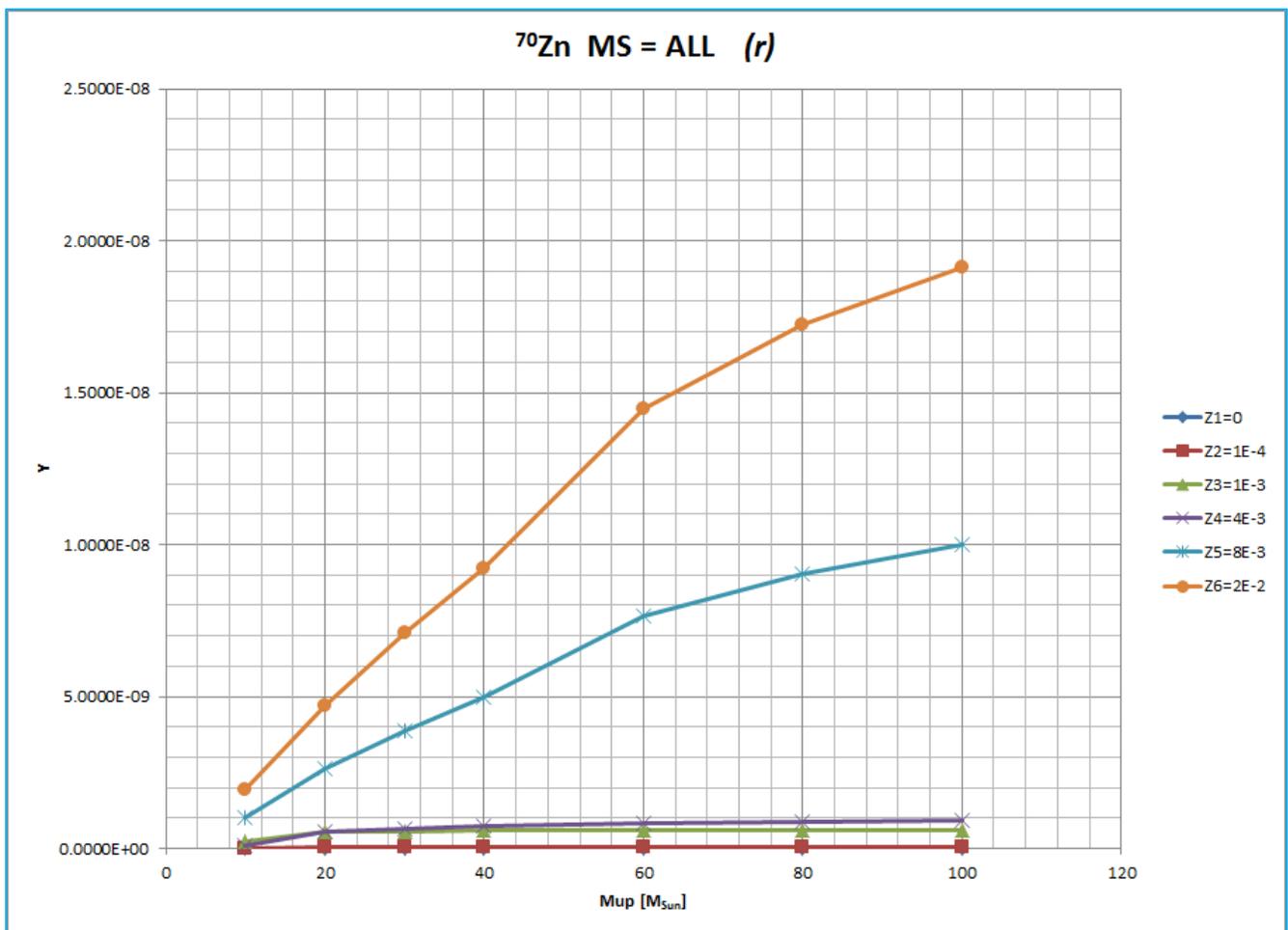


Figura A.34: Gráfica Y_i vs m de ⁷⁰Zn para $MS = ALL$

Z

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	0.0000E+00	2.6706E-03	2.3076E-03	1.0969E-03	7.1626E-04	1.6500E-04
20	0.0000E+00	2.5794E-03	2.2289E-03	1.0595E-03	6.9181E-04	1.5937E-04
30	0.0000E+00	2.5446E-03	2.1988E-03	1.0452E-03	6.8248E-04	1.5722E-04
40	0.0000E+00	2.5264E-03	2.1830E-03	1.0377E-03	6.7759E-04	1.5609E-04
60	0.0000E+00	2.5057E-03	2.1651E-03	1.0292E-03	6.7203E-04	1.5481E-04
80	0.0000E+00	2.4949E-03	2.1558E-03	1.0248E-03	6.6914E-04	1.5414E-04
100	0.0000E+00	2.4875E-03	2.1494E-03	1.0217E-03	6.6714E-04	1.5368E-04

Tabla A.35: Y_i de Z para LMS

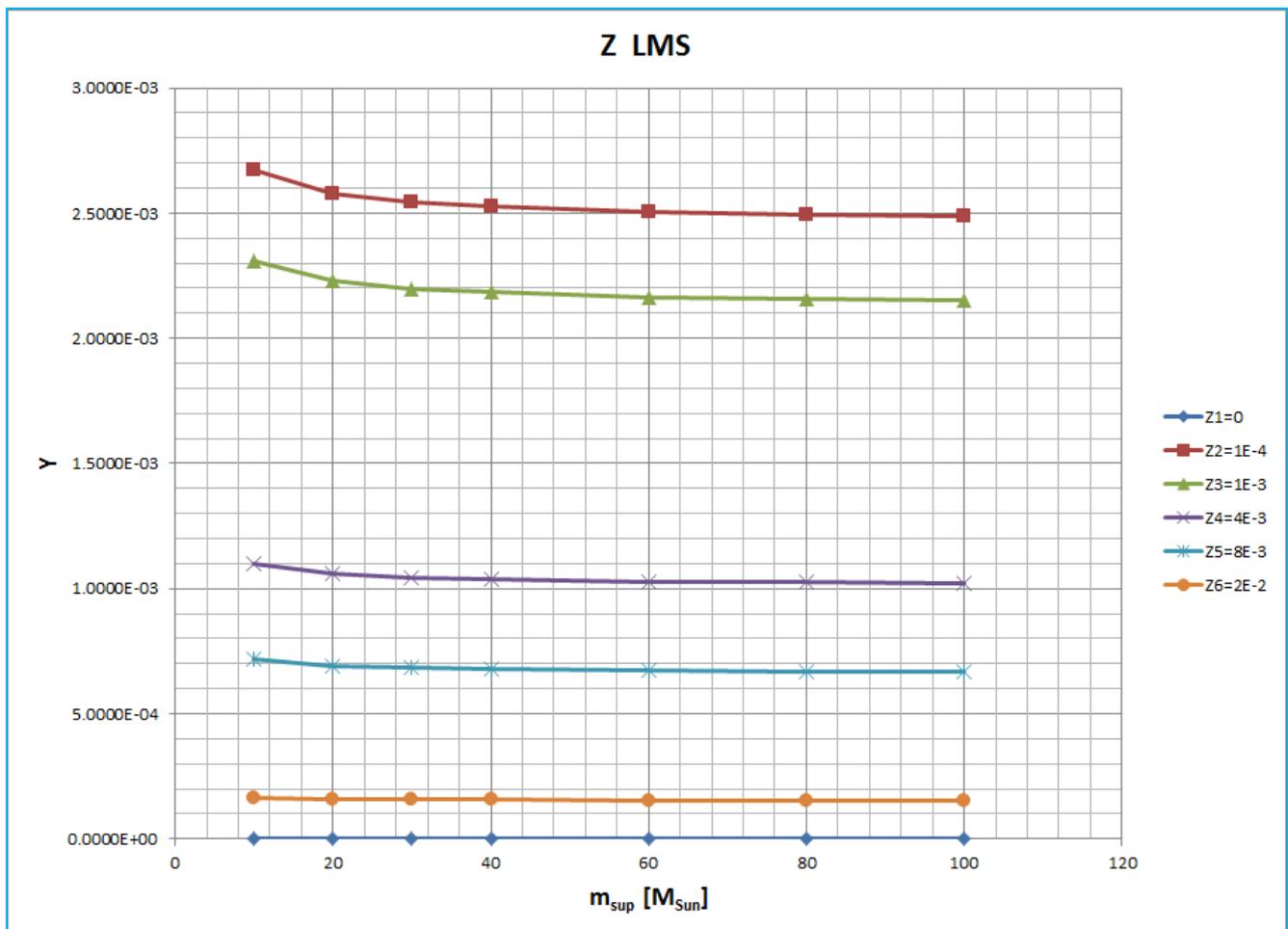


Figura A.35: Gráfica Y_i vs m de Z para LMS

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	0.0000E+00	7.4196E-04	8.1078E-04	1.0401E-03	8.9012E-04	4.5877E-04
20	0.0000E+00	7.1664E-04	7.8311E-04	1.0046E-03	8.5974E-04	4.4311E-04
30	0.0000E+00	7.0697E-04	7.7254E-04	9.9102E-04	8.4814E-04	4.3714E-04
40	0.0000E+00	7.0190E-04	7.6701E-04	9.8392E-04	8.4206E-04	4.3400E-04
60	0.0000E+00	6.9615E-04	7.6072E-04	9.7586E-04	8.3516E-04	4.3045E-04
80	0.0000E+00	6.9316E-04	7.5745E-04	9.7166E-04	8.3157E-04	4.2859E-04
100	0.0000E+00	6.9108E-04	7.5518E-04	9.6876E-04	8.2908E-04	4.2731E-04

Tabla A.36: Y_i de Z para IMS

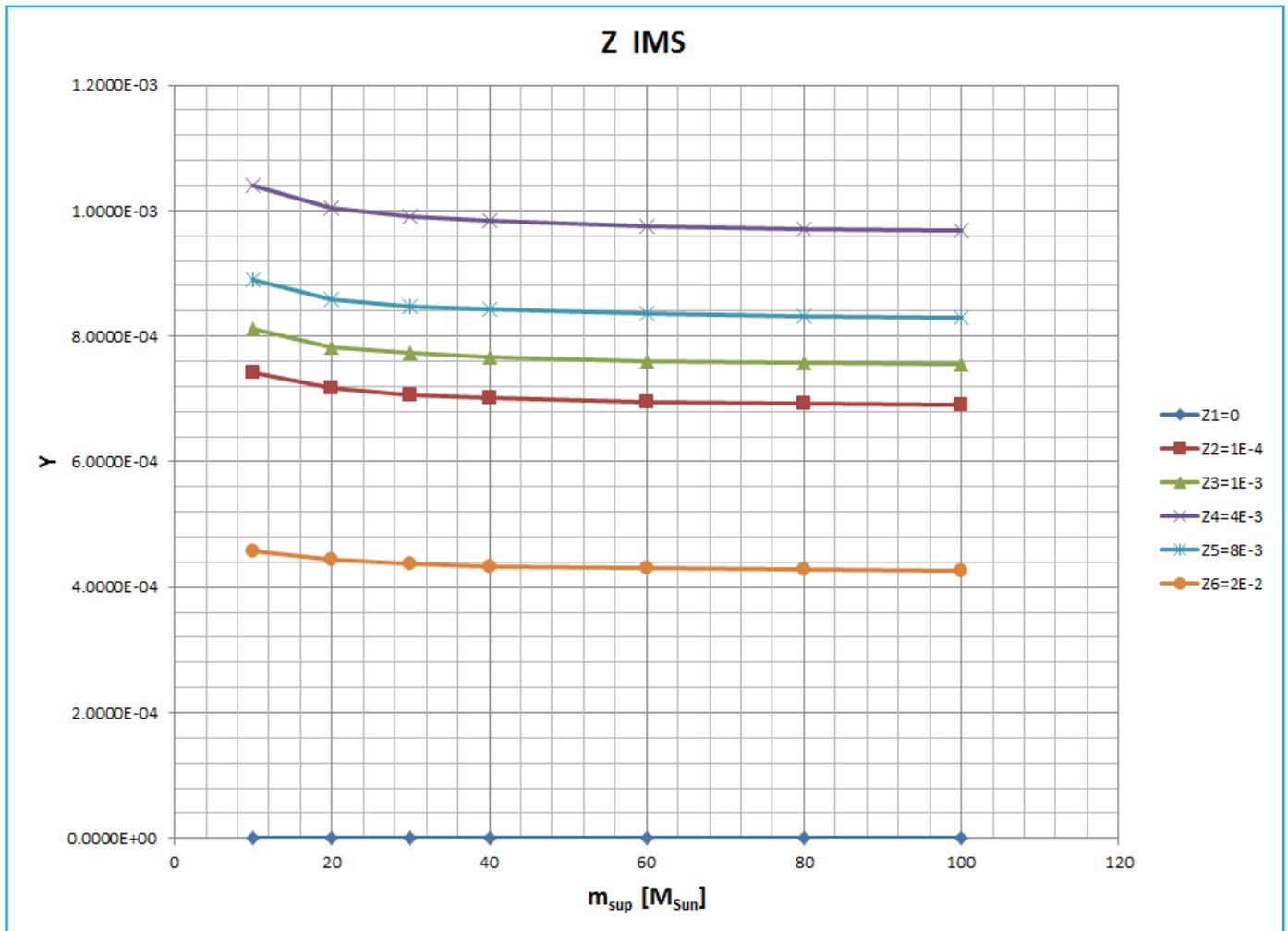


Figura A.36: Gráfica Y_i vs m de Z para IMS

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	1.2864E-02	1.9092E-03	1.1253E-03	9.2887E-04	7.2820E-04	5.2871E-04
20	1.5851E-02	7.4372E-03	3.5942E-03	3.0801E-03	2.5069E-03	1.9370E-03
30	1.9555E-02	1.1502E-02	6.3903E-03	4.9055E-03	4.3500E-03	3.7976E-03
40	2.2028E-02	1.4518E-02	8.2936E-03	6.7854E-03	6.2765E-03	5.7703E-03
60	2.4775E-02	1.8098E-02	1.0421E-02	9.0750E-03	8.8198E-03	8.5674E-03
80	2.6091E-02	2.0004E-02	1.1553E-02	1.0294E-02	1.0174E-02	1.0056E-02
100	2.6902E-02	2.1304E-02	1.2326E-02	1.1125E-02	1.1097E-02	1.1072E-02

Tabla A.37: Y_i de Z para MS

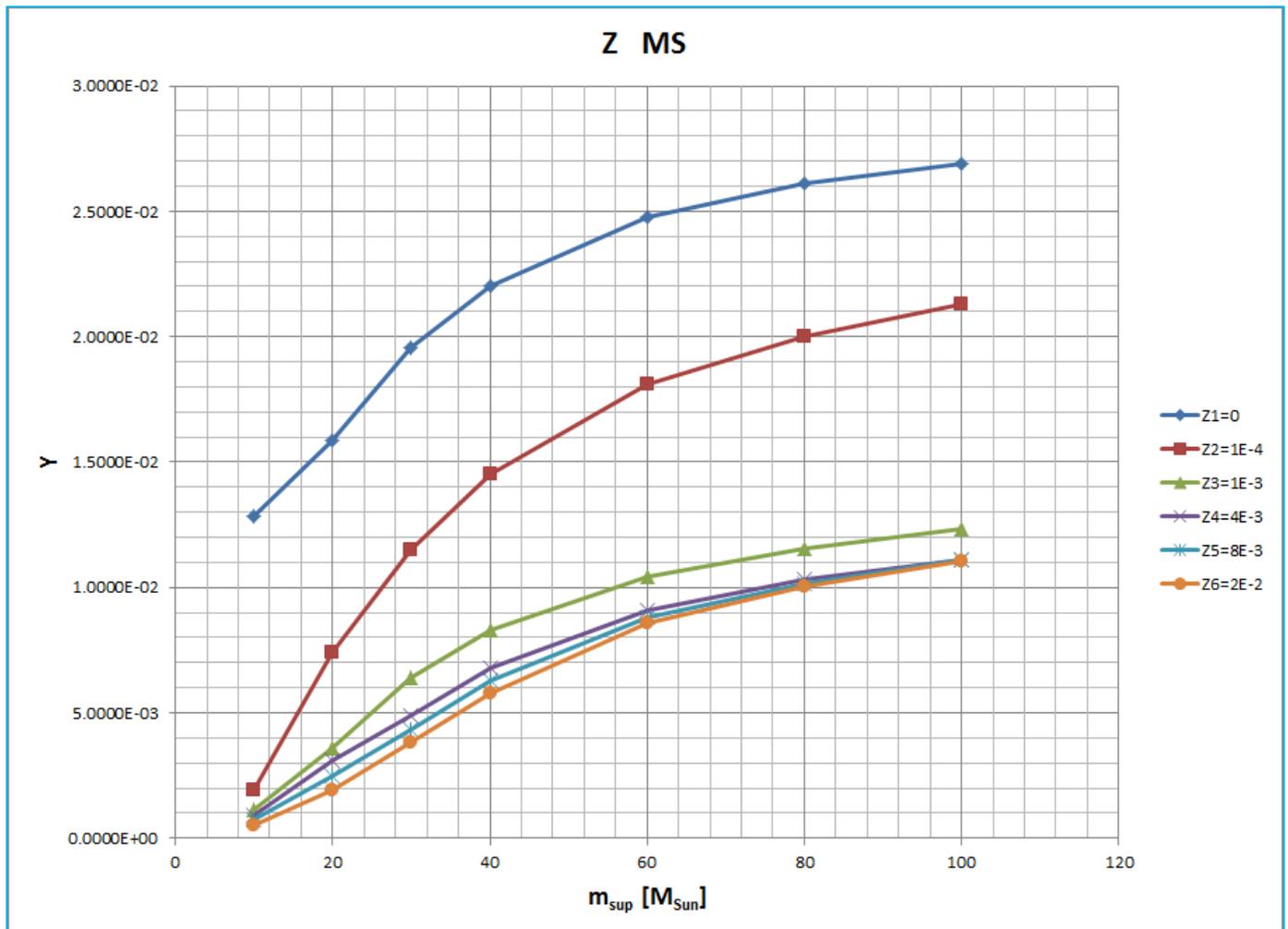


Figura A.37: Gráfica Y_i vs m de Z para IMS (valor de Z_1 dividido entre 10)

m_{sup}	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
10	1.2864E-02	5.3217E-03	4.2437E-03	3.0659E-03	2.3346E-03	1.1525E-03
20	1.5851E-02	1.0733E-02	6.6062E-03	5.1442E-03	4.0584E-03	2.5395E-03
30	1.9555E-02	1.4754E-02	9.3616E-03	6.9417E-03	5.8806E-03	4.3919E-03
40	2.2028E-02	1.7746E-02	1.1244E-02	8.8070E-03	7.7961E-03	6.3604E-03
60	2.4775E-02	2.1300E-02	1.3346E-02	1.1080E-02	1.0327E-02	9.1526E-03
80	2.6091E-02	2.3192E-02	1.4466E-02	1.2290E-02	1.1674E-02	1.0639E-02
100	2.6902E-02	2.4483E-02	1.5230E-02	1.3116E-02	1.2594E-02	1.1653E-02

Tabla A.38: Y_i de Z para ALL

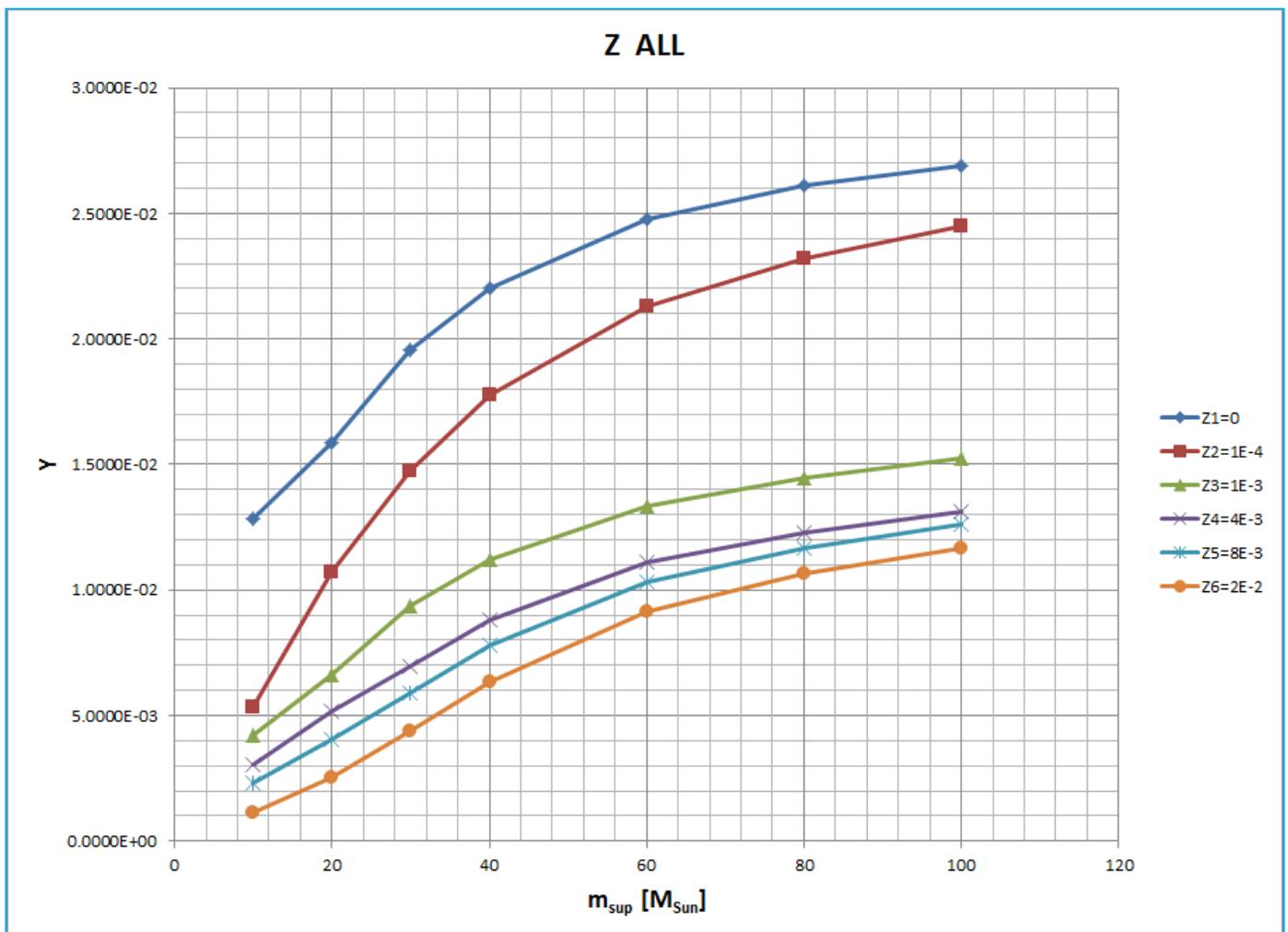


Figura A.38: Gráfica Y_i vs m de Z para ALL (valor de Z_1 dividido entre 10)