

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

ESCUELA DE POST – GRADO

ESPECIALIDAD DE SUELOS



**EFFECTO DE LA APLICACIÓN DIRECTA E INDIRECTA DE
AZUFRE EN LOS CULTIVOS DE CEBOLLA Y PAPA BAJO
CONDICIONES DE CAMPO E INVERNADERO.**

Tesis para optar el Grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

LILY DENISE TELLO PERAMAS

LIMA – PERU

1999

INDICE

	Página
I. INTRODUCCION	1
II. JUSTIFICACION	3
III. OBJETIVOS	4
IV. REVISION DE LITERATURA	5
V. MATERIALES Y METODOS	37
5.1 MATERIALES	37
5.1.1. Lugar de ejecución	37
5.1.2. Datos de clima	37
5.1.3. Características de los suelos	38
5.1.4. Características de los cultivos	42
5.1.5. Fertilizantes empleados	43
5.1.6. Reactivos empleados	44
5.1.7. Equipos empleados	44
5.2 METODOLOGIA	44
5.2.1. Fase de invernadero	44
5.2.2. Fase de Laboratorio	46
5.2.3. Fase de Campo	47
5.3 DISEÑO ESTADISTICO	49
VI. RESULTADOS Y DISCUSION	50
6.1. RESULTADOS INVERNADERO	50
6.1.1. EFECTOS DE PRIMER ORDEN	50
6.1.1.1 Efecto primario del nitrógeno (N)	50
6.1.1.2. Efecto primario del fósforo (P)	51

6.1.1.3. Efecto primario del potasio (P)	52
6.1.1.4. Efecto primario del estiércol (MO)	52
6.1.1.5. Efecto primario de la flor de azufre (S)	53
6.1.2. EFECTOS DE SEGUNDO GRADO	56
6.1.2.1. Interacciones N x P, N x K y N x MO	56
6.1.2.2. Interacciones P x K y P x MO x y K x MO	57
6.1.3. EFECTOS DE TERCER GRADO	63
6.1.3.1. Interacción N x P x K	63
6.1.3.2. Interacciones N x P x MO, N x K x MO y P x K x MO	63
6.1.4. EFECTOS DE CUARTO GRADO	69
6.1.4.1. Interacción N x P x K x MO	69
6.1.5. Efecto de la aplicación de fertilizantes con azufre y de la flor de azufre en la acumulación de este nutriente en los bulbos.	73
6.2 RESULTADOS CAMPO	74
6.2.1. EFECTOS PRINCIPALES	74
6.2.1.1. Efecto primario del nitrógeno (N)	74
6.2.1.2. Efecto primario del fósforo (P)	74
6.2.1.3. Efecto primario del potasio (K)	75
6.2.2. EFECTOS DE SEGUNDO GRADO	78
6.2.2.1 Interacciones N x P, N x K y P x K	78
6.2.3. EFECTOS DE TERCER GRADO	78
6.2.3.1 Interacción N x P x K	78
VII. CONCLUSIONES	81
7.1. Conclusiones experimentos invernadero	81
7.2 Conclusiones experimentos campo	82

VIII.	RECOMENDACIONES	83
IX.	BIBLIOGRAFIA	85
X.	ANEXOS	91

I. INTRODUCCION

El azufre es un macronutriente secundario esencial necesario para la formación de aminoácidos, vitaminas, enzimas, etc.

El incremento geométrico del uso de los fertilizantes nitrofosfopotásicos ha sido el factor determinante en el aumento de la productividad y producción de alimentos en el mundo durante las dos últimas décadas. La inclusión del azufre ha jugado un rol técnico y comercial en la fabricación de los fertilizantes nitrogenados, fosforados y potásicos razón por la cual de 1975 a 1985 el consumo de azufre en el mundo se ha incrementado de 19.6 a 57 millones de toneladas. El uso de azufre en la fabricación de fertilizantes fosforados ha tenido un gran impacto en su demanda y esta forma de uso va abarcar dentro de poco, alrededor del 55% de todo el azufre consumido.

La tendencia de la agricultura moderna se dirige hacia necesidades mayores de azufre sobre la base de cultivos más productivos, agricultura más intensiva y productos agroquímicos, especialmente fertilizantes, con menores cantidades de este elemento. Como resultado, son cada día más comunes las deficiencias de este elemento y es más común la respuesta a fertilizantes con azufre.

Actualmente se vienen reportando deficiencias de azufre en diferentes partes del mundo (aproximadamente 72 países). Estas deficiencias se deben principalmente:

1. al incremento del uso de fertilizantes más concentrados que contienen poco o nada de azufre en su composición (urea, fosfato de amonio, superfosfato triple de calcio, cloruro de potasio)
2. a la alta producción de los cultivos los cuales toman gran cantidad de azufre del suelo
3. al mayor control de la emisión de azufre industrial
4. al menor uso de pesticidas y funguicidas azufrados
5. y al menor contenido de reservas de azufre en el suelo.

Los suelos de acuerdo a sus características funcionan como bancos de azufre, entre otros elementos, obviamente todo el azufre requerido por los cultivos no puede ser dado por el suelo, lluvia, agua de riego ni materia orgánica pero si puede ser dado por aplicación vía fertilizantes que lo contengan.

Nuestro país ya se encuentra en lista de países con suelos con problemas de deficiencia en azufre, debido a que se están consumiendo fertilizantes concentrados conteniendo poco o nada de azufre en su composición. Por otra parte los suelos costeros son de bajo contenido de materia orgánica y/o con textura arenosa, razón por la cual responden positivamente ante una aplicación de azufre vía fertilizantes que lo contengan o materia orgánica o flor de azufre.

II. JUSTIFICACION

Los cultivos en general necesitan más de 16 elementos nutritivos minerales para su normal desarrollo. Tradicionalmente tres de ellos, nitrógeno, fósforo y potasio, se conocen como macroelementos primarios; las plantas requieren grandes cantidades de estos elementos y los programas de fertilización los aportan en forma adecuada. El calcio, magnesio y azufre son considerados macroelementos secundarios debido a que la planta los requiere en grandes cantidades pero generalmente están presentes en el suelo en cantidades suficientes como para permitir cosechas con altos rendimientos. Otro grupo de elementos como el zinc, cobre, molibdeno, manganeso, cloro, etc; son los llamados microelementos porque las plantas los requieren en pequeñas cantidades y al igual que los macroelementos secundarios se encuentran en cantidad suficiente en el suelo. Sin embargo, la mayor demanda de alimentos a nivel mundial ha requerido un mayor uso de fertilizantes los cuales a su vez tienden a estar más concentrados disminuyéndose así el aporte indirecto de azufre al suelo vía uso de fertilizantes que lo contengan; de igual manera al haber una mayor producción de los cultivos también se ha incrementado la extracción de nutrientes teniéndose, en el caso del azufre, incrementos de 19.6 ha 57 millones de toneladas por década. Muchos cultivos extraen azufre y fósforo en cantidades similares y su importancia radica en la formación de proteínas, enzimas y vitaminas.

En nuestro país se han realizado pocos estudios al respecto a pesar de que el azufre podría llegar a ser un elemento limitante en una agricultura empresarial de alta productividad. Por ello, es importante estudiar como influiría el azufre en el rendimiento en cantidad, calidad de los cultivos de la costa, sierra y selva bajo diferentes condiciones de clima, suelo, cultivo y tecnología. Por ejemplo se ha llegado a determinar que la producción de una tonelada de cebolla extrae aproximadamente 1.1 Kg de azufre y producir una tonelada de papa extrae 0.8 Kg de azufre.

III. OBJETIVOS

1. Evaluar el efecto de fuentes y niveles de los fertilizantes nitrofosfopotásicos como una fuente indirecta de azufre en cultivos exigentes (cebolla) y poco exigentes (papa) bajo condiciones de invernadero y de campo.
2. Evaluar la influencia de diferentes tipos de suelos y el contenido de materia orgánica como un indicador de la suficiencia e insuficiencia de azufre.
3. Evaluar otras fuentes indirectas de azufre como el estiércol y directas como el azufre en flor.

IV. REVISION DE LITERATURA

4.1 Importancia del azufre en la producción de los cultivos.

Como se ha mencionado el azufre es uno de los macro elementos secundarios esenciales de las plantas. Los cultivos anuales con buenos rendimientos extraen entre 15 y 50 Kg S ha⁻¹, cifras similares a las extracciones de el fósforo y magnesio. Las leguminosas y las crucíferas tienen las más altas exigencias de azufre así como los árboles frutales. La importancia del azufre es similar a la del nitrógeno y el fósforo en la formación de proteínas; el azufre es un componente esencial de algunas vitaminas y enzimas. Se han detectado carencia de azufre en cultivos por todo el mundo, excepto en regiones costeras que reciben este elemento con las espumas marinas y en las proximidades de centros industriales y urbanos que pueden recibirlo procedente del SO₂ atmosférico. Debido a que desde 1970 se tiende a utilizar combustibles fósiles que desprendan menos SO₂, y al uso cada vez más importante de fertilizantes más concentrados que contienen muy poco o nada de azufre en su composición, puede esperarse que la deficiencia de este elemento vaya en aumento (Bornemisza, 1990; Russell, 1992; Mengel & Kirkby, 1982).

A menudo se observa que el azufre tiene un efecto favorable no sólo sobre el rendimiento, sino también sobre la calidad; por ejemplo ha producido un alto mejoramiento en la calidad de la cosecha en:

1. Hortalizas con marcado metabolismo de nitrógeno y proteína.
2. Hortalizas que se utilizan por el fruto y semillas.
3. Hortalizas cuyo valor depende del contenido de azúcar en la cosecha.
4. Cuando debe prestarse consideración a las propiedades de conservación o características de almacenamiento.
5. Cultivos que contienen mayor cantidad de este elemento en sus tejidos, sobretodo si crecen en terrenos de textura ligera bajos en materia orgánica (ver tabla 1) (Western, s/a)

Tabla 1. Extracción de azufre en diferentes cultivos concordante con los rendimientos obtenidos (Western Ag-Minerals Company; s/a).

Cultivo	Rendimiento t ha ⁻¹	Extracción de azufre (Kg ha ⁻¹)
papa	56.0	25.0
col	45.0	41.4
nabo	56.0	42.6
cebolla	37.0	34.0
alfalfa	22.0	25.0
trigo	6.0	30.0
maíz	6.0	25.0
sorgo	4.0	15.0
tomate	50.0	30.0
cítricos	30.0	30.0
piña	50.0	20.0
algodón (fibra)	1.0	20.0
caña de azúcar	100.0	60.0

En el estado de Washington, en experimentos, el brócoli respondió muy bien a las aplicaciones de azufre (ver tabla 2); se comprobó que había cierta relación general entre los contenidos de nitrógeno y azufre de las hojas de esta planta. Se observa que las plantas con deficiencia de azufre (tratamientos 1 y 2) tenían relaciones S:N muy amplias, aun cuando las hojas de las muestras procedentes de la parte más baja de las plantas mostraban color verde (Western, s/a).

Tabla 2. Azufre en brócoli (Western Ag-Minerals Company; s/a).

Tratamiento	Hojas analizadas	% S	%N	Relación S:N
1. Testigo	Basales verdes	0.12	4.39	1:37
	terminales cloróticas	0.10	6.28	1:63
2. menos azufre	terminales cloróticas	0.07	6.28	1:90
3. 74 Kg ha ⁻¹ S	terminales verdes	0.19	2.30	1:12
4. 118 Kg ha ⁻¹ S	terminales verdes	1.23	6.02	1:50

La **cebolla** es uno de los cultivos que más consume el azufre, extrayendo en una cosecha de 37 t ha⁻¹ un total de 34 Kg de azufre, de éste, 22 en la cosecha y 12 en el follaje. Para reponer el azufre extraído se sugiere aplicar hasta 41 Kg S ha⁻¹ obteniéndose incrementos de hasta 19% en la cosecha (Bornemisza, 1990).

4.1.1 Deficiencia y toxicidad de azufre en los cultivos

Las deficiencias suelen presentarse en las regiones donde los aportes atmosféricos son inferiores a 5-10 Kg S ha⁻¹ año⁻¹ y en los casos en que el contenido de SO₄²⁻ del suelo sea muy bajo, como en los suelos muy lavados. La fuente inmediata de azufre edáfico para los cultivos son los SO₄²⁻ de la solución del suelo y ésta ha de renovarse por la desorción procedente de las arcillas e hidróxidos. Se han obtenido respuestas positivas de los cultivos a los aportes de sulfatos en muchos países y, especialmente, se han comprobado diferencias notables en algunas regiones de EEUU, Australia y Nueva Zelanda.

Como el azufre es un constituyente esencial de las proteínas, su deficiencia resulta en una inhibición de la síntesis de las mismas. Por lo tanto en los tejidos de las plantas deficientes en azufre se acumulan aminoácidos que no contienen este elemento, como la asparagina, glutamina y arginina, principalmente; se ha observado en plantas deficientes en azufre, una acumulación de

amidas nitrogenadas las cuales están asociadas con un bajo contenido de azúcar, resultado de la pobre actividad fotosintética de las plantas cloróticas deficientes en azufre, por lo tanto tienen un bajo contenido de proteínas no sólo en la parte vegetativa sino también en los granos de los cereales (Beaton, 1966; Bornemisza, 1990; Fassbender, 1982; Mengel & Kirkby, 1982).

La relación N orgánico/S orgánico es muy alta en tejidos de plantas deficientes en azufre (70/1 a 80/1), comparado con los tejidos de las plantas normales; otro indicador de deficiencia de azufre en plantas es la acumulación de nitratos en sus tejidos.

En cultivos de campo las deficiencias de nitrógeno y azufre son difíciles de distinguir, por lo que debe acudir a los análisis foliares, que resultan más fiables. Las plantas deficientes en azufre son afectadas en su crecimiento, siendo los tallos más afectados que las raíces. Las plantas son rígidas y quebradizas y los tallos delgados. La formación de los cloroplastos es afectada, los síntomas de clorosis se presentan en las hojas más jóvenes. En general, la materia seca de las hojas jóvenes deben contener más del 0.15-0.20% S, aunque el valor crítico depende del cultivo y disminuye con la edad de las hojas. También se ha utilizado la relación entre N y S proteicos o, incluso más frecuentemente, entre el N y S totales. Algunos investigadores prefieren utilizar el S mineral (SO_4^{2-}) presente en la planta expresado como % del azufre total; un valor superior al 20% indica un suministro adecuado. Para las gramíneas y los cereales, una relación en las hojas N total/S total superior a 14 puede indicar carencia de azufre.

La influencia del nivel de nutrición del SO_2 atmosférico en el crecimiento de las plantas se observa en la tabla 3, donde se evidencian sus efectos favorables sobre éstas obtenidos a bajos niveles de SO_2 en la atmósfera. A niveles altos, de $1.5 \text{ mg SO}_2 \text{ m}^{-3}$, el crecimiento fue afectado, apareciendo síntomas de necrosis en las hojas de maíz y girasol. Asimismo, el crecimiento de las plantas en cámaras de medio ambiente controlado, fue disminuido, en ausencia de SO_2 atmosférico (Marschner, 1986; Mengel & Kirkby, 1982).

Tabla 3. Efecto de la concentración atmosférica del SO₂ sobre el crecimiento de varias especies de plantas, creciendo en una solución nutritiva libre de sulfato (Faller, 1968, citado por Bromfield, 1973).

	Concentración de SO ₂ mg SO ₂ m ⁻³					Periodo experimental en días
	0.0	0.2	0.5	1.0	1.5	
	rendimiento g MS planta ⁻¹					
Girasol	70	103	103	113	100	15
Maiz	100	110	110	111	107	13
Tabaco	31	41	43	54	46	9

El valor nutritivo de los cereales se reduce en las plantas con deficiencia de azufre, debido a su menor síntesis de cisteína, metionina y otros aminoácidos esenciales. Los granos de trigo con carencia de azufre proporcionan una masa dura con pequeña elasticidad, que origina baja calidad panadera. La falta de azufre en los forrajes influye en el crecimiento de los rumiantes; por ejemplo, la ganancia media diaria de peso en corderos que pastaban una pradera de trébol y gramíneas aumentó cuando se aportaron sulfatos a la pradera. Se obtuvo un 90% del máximo aumento diario de peso cuando la materia seca de la hierba contenía el 0.19% S (Russell, 1992).

Las plantas son insensibles a las altas concentraciones de sulfatos en el medio nutritivo, sólo en casos donde las concentraciones de sulfato son de alrededor de 50mM, como en algunos suelos salinos, el crecimiento de las plantas es afectado adversamente. La concentración crítica de SO₂ en la atmósfera sobre la cual los efectos tóxicos en las plantas son observadas, están en el rango de 0.5 a 0.7 mg SO₂ m⁻³.

Los síntomas de toxicidad son, una reducción del crecimiento y una coloración verde oscura en las hojas, pero estas no son específicas para un exceso de azufre, siendo más típicas para las plantas afectadas por sales. Sin embargo en concentraciones isoosmóticas, se produce un efecto más detrimental por la salinidad del sulfato que por la del cloro. Las causas de la toxicidad del SO_2 , es que el gas SO_2 y los aniones de azufre (HSO_3^- y SO_3^{2-}) pueden acumularse y desactivan la fotofosforilación (formación de ATP).

4.1.2 El azufre en la nutrición de la planta.

El mecanismo actual de la toma de sulfato por la planta no es entendido totalmente. Se cree que existe un mecanismo simple de absorción del $\text{SO}_4^{=}$, la selectividad del cual depende mucho de la concentración de sulfato en la solución nutritiva. Se supone que el $\text{SO}_4^{=}$ es tomado por la planta mediante un proceso activo (Mengel & Kirkby, 1982).

Este elemento es translocado principalmente en dirección ascendente mientras que el movimiento descendente es muy pobre y ante la deficiencia de azufre, el sulfato es translocado de las raíces y peciolo hacia las hojas jóvenes y el azufre de las hojas viejas no es proporcionado a los tejidos jóvenes lo que demuestra que la translocación no se da por flujo de masas. El sulfato es poco móvil en la planta, al igual que el calcio y los elementos menores. Por lo tanto los síntomas de deficiencia se presentan en las hojas jóvenes. Las plantas utilizan el SO_2 atmosférico, siendo este absorbido a través de los estomas y distribuido en toda la planta, para constituir los aminoácidos, proteínas y sulfatos (Mengel & Kirkby; 1982).

Luego de ser asimilado el $\text{SO}_4^{=}$, es reducido, lo cual se demuestra por las moléculas orgánicas mayores que contienen azufre, en las cuales este elemento está presente en una forma reducida. Estos compuestos orgánicos incluyen la cisteína, cistina y metionina y las proteínas que contienen estos aminoácidos.

Actualmente se acepta que el primer paso para la incorporación del azufre en el tejido vegetal es a través de una reacción entre H_2SO_4 y ATP. El grupo sulfuril del ácido sulfúrico reemplaza el grupo fosforil del ATP, formando adenosina fosfosulfato y pirofosfato. Esta reacción es catalizada por una enzima, la ATP sulfurilasa.

El sulfato es principalmente reducido durante los períodos de iluminación, debido a que las enzimas de reducción de los sulfatos se localizan en la membrana de los cloroplastos. La cisteína es el primer producto estable en el cual el azufre está presente en una forma reducida orgánicamente enlazada. La cisteína es un precursor de la metionina, siendo ambos los más importantes aminoácidos que contienen azufre en las plantas.

Una función principal del azufre en las proteínas o polipeptidos es en la formación de enlaces disulfidos entre cadenas de polipeptidos. Es así que dos moléculas de cisteína se unen mediante el enlace S-S, de los grupos SH, para sintetizar el dipeptido cistina (Marschner, 1986).

La formación de enlaces disulfidos en polipeptidos y proteínas es una función esencial del azufre, debido a que los puentes S-S contribuyen a la conformación de proteínas enzimáticas.

El contenido total de azufre en los tejidos de las plantas es de 0.2 a 0.5% en la materia seca. Se conoce que el exceso de azufre absorbido por la planta es almacenado como sulfato (Mengel & Kirkby, 1982).

4.1.3 Rol del azufre

- Síntesis de los aminoácidos que contienen azufre: cistina, cisteína y metionina y síntesis de proteínas con estos aminoácidos.
- Activación de enzimas proteolíticas tales como las papainazas.
- Constituyente de ciertas vitaminas como la biotina.
- Se encuentra presente en los aceites de algunas especies, incrementando su contenido en cultivos tales como la soya.
- Se ha relacionado los enlaces de disulfuro con la resistencia al frío y la sequía.
- Síntesis de glucósidos que dan olor a los aceites esenciales de muchas plantas como las Liliáceas y Crucíferas (The Sulphur Institute, s/a).

4.2 El azufre en el suelo.

4.2.1 El azufre en las rocas - suelos

El contenido total de azufre en las rocas ígneas y metamórficas varía entre 300 y 700 ppm, correspondiendo los valores más elevados a las rocas máficas. En las rocas ígneas suele presentarse en forma de sulfuro, especialmente en las de reacción básica, y al meteorizarse las rocas el azufre se libera en forma de sulfato. Como los sulfatos se encuentran también en el agua de mar en concentraciones media de $28 \cdot 10^{-3}$ M, muchos suelos costeros aluviales contienen sulfatos y sulfuros, y las rocas sedimentarias formadas son ricas en sulfuro ferroso o en sulfato cálcico. Los sulfatos también se presentan precipitados como impurezas en algunas rocas calcáreas, en las concreciones de carbonato cálcico y en el coral. Por estos motivos las concentraciones de azufre en el suelo presentan gran variabilidad. Se citan valores tan bajos como 0.2-0.3 ppm en suelos arenosos y tan altos como 3-5% en mariscas. En la rehabilitación de suelos con sulfuros, la oxidación a sulfato origina fuerte acidificación, a menos que el suelo sea rico en carbonato cálcico (Burbano y Blasco, 1975; Fassbender, 1982; Gros, 1981).

4.2.2 El azufre en Entisoles e Inceptisoles.

Los Entisoles son suelos que muestran muy poco o ningún desarrollo de horizontes. Algunos tienen un horizonte con materia orgánica y algunos un horizonte que muestra la influencia de su cultivo. Muchos de ellos son muy recientes; otros, suelos típicos aluviales de valles frecuentemente alterados por inundaciones.

Los Inceptisoles son suelos de regiones húmedas con horizontes que han perdido bases y sesquióxidos pero tienen todavía minerales que pueden meteorizarse. Son suelos relativamente recientes, aunque más desarrollados que los Entisoles.

La edad más reciente de estos suelos resulta en que no todos son bajos en azufre. Probablemente el historial agrícola que desemboca en diferentes grados de extracción y reposición del elemento, es el factor determinante para saber si lo requieren o no. Bornemisza y colaboradores en 1978 para Costa Rica observaron buenas correlaciones entre los resultados de análisis de suelos, la producción en el invernadero y la respuesta a la aplicación de sulfato; la información existente muestra que aproximadamente la mitad de estos suelos, probablemente los más lavados y más intensamente usados son bajos en azufre (Bornemisza, 1990).

4.2.3 Contenido total de azufre en suelos

El contenido de azufre total en los suelos varía considerablemente pudiendo encontrarse valores que van desde 30 a 50 ppm hasta tan altos como 400 ppm y posiblemente mucho más altos en suelos de regiones áridas debido a la acumulación de sulfatos o al ascenso de aguas subterráneas ricas en sulfatos o como resultado del contenido de sulfatos en el agua de riego aplicada; los principales compuestos que se acumulan son el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), o la anhidrita (CaSO_4) y la epsomita ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), en cantidades menores se encuentran minerales poco

solubles, como los sulfuros: esfalerita (ZnS) y calcopirita (CuFeS₂) (Fassbender, 1994). Se citan valores promedio de azufre total en las capas arables de suelos de la región templada que van desde 200 ppm en Ultisoles hasta 500 ppm en Mollisoles. Los suelos de regiones templadas tiene generalmente un contenido más alto de azufre cuanto mayor es el contenido de materia orgánica; por otro lado, los suelos tropicales con valores altos de materia orgánica de alófono tienen cantidades altas de azufre total con un promedio de dos tercios de azufre total como inorgánicos en suelos de Centroamérica (Bornemisza, 1959; Fassbender, 1982), por ejemplo un Eutrodept de Hawai con 1280 ppm en la capa arable (Mengel y Kirkby, 1982; Quevedo, s/a).

Los suelos orgánicos son los que tienen las mayores reservas de azufre orgánico, el cual proviene de los residuos vegetales, animales y microorganismos que se incorporan al suelo ; consiste en una parte importante de proteínas y sus derivados, como los aminoácidos que contienen azufre, varios de los cuales fueron detectados en extractos de suelos. Se cree que la formación del azufre orgánico depende de los factores generales que regulan la acumulación de la materia orgánica.

En muchos suelos tropicales se observó una buena correlación entre el azufre total y el azufre orgánico (Kamprath, 1983). Para la caracterización del azufre orgánico se emplea la relación C/N/S-orgánico (125:10:1.2); el valor C/S es similar al valor C/P y generalmente es de 100 a 200. En suelos recientes o en regiones secas los valores son mayores. El azufre orgánico puede presentarse formando dos tipos de compuestos: azufre ligado al carbono y azufre que se encuentra formando sulfatos fenólicos y de colina así como de lípidos.

El ión sulfato está presente en la solución suelo o es adsorbido por los coloides del suelo. Los sulfatos de la solución suelo están en equilibrio con las formas de azufre de la fase sólida (arcillas silicatadas y arcillas de óxidos e hidróxidos de fierro y aluminio) así como con sulfatos sólidos de distinto producto de solubilidad y los aportes de la mineralización del azufre de la materia orgánica. El ión sulfato debido a que no se adsorbe muy fuertemente en el suelo y a la

solubilidad de muchas de sus sales, tiene gran movilidad en la solución del suelo y puede lixiviarse casi tan fácilmente como el nitrato. Dependiendo de la intensidad de la lluvia y de la textura del suelo, las cantidades que pueden perderse por lavado serían del orden de los 100 Kg S ha⁻¹.

La principal forma inorgánica de azufre en el suelo es como sulfato y sulfuros. Estos últimos se manifiestan particularmente en condiciones de anaerobiosis y al incrementarse el potencial de oxido reducción ellos se oxidan a sulfatos, forma en que predomina bajo condiciones normales.

Las arcillas y los óxidos de Fe y Al especialmente en condiciones ácidas son importantes en la retención de sulfatos por el suelo (Urbano y Rojo, 1992). La adsorción de sulfatos incrementa conforme el pH de los suelos baja y es mayor en arcillas 2:1.

4.2.4 Procesos dinámicos de transformación del azufre.

Ciclo del azufre en los suelos. Los procesos dinámicos del azufre son similares a los del nitrógeno. En el ciclo del azufre se observan transformaciones debidas a procesos que ocurren principalmente por la acción de diferentes microorganismos. En forma semejante que para otros elementos, se puede considerar a la solución del suelo como fuente principal de la que las plantas o microorganismos absorben el azufre. Los residuos de todos ellos son mineralizados por microorganismos, produciendo azufre inorgánico oxidado o reducido. La mineralización del azufre orgánico sigue un esquema similar al del nitrógeno orgánico. Se cree que cuando se libera H₂S, este es rápidamente oxidado en sulfato.

El lavado de los suelos genera una importante pérdida de azufre. Pearson y colaboradores en 1962 observaron que en suelos de Puerto Rico, un 90% de los cationes lavados se perdió con sulfato como anión acompañante; mientras que los nitratos y cloruros sólo contribuyeron con un

seis y uno por ciento respectivamente. En regiones industriales, según Coleman (1966), el azufre en las lluvias es fuente de apreciables cantidades con niveles que generalmente exceden $20 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; en general, en estas regiones no se observan deficiencias de azufre. Para el caso de los Andes Occidentales de Venezuela, Steinhardt y Fassbender (1979) informan sobre la presencia de apenas $11.8 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de azufre en las lluvias, un contenido relativamente alto para regiones tropicales, fenómeno influido posiblemente por las zonas con instalaciones petroquímicas. Kamprath y Till (1983) estiman que la lluvia es fuente de menos de $5 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ del azufre, lo que no cubre las necesidades de una agricultura intensiva.

Oxidación y reducción. Los procesos de oxidación y reducción del azufre en los suelos son importantes en la dinámica de este elemento y, en general, para el balance redox del suelo. El azufre se reduce en condiciones anaeróbicas y se oxida en condiciones aeróbicas.

Movimiento y adsorción de sulfatos. La adsorción de sulfatos es un proceso importante en los suelos ácidos, particularmente en los caoliniticos. Gran parte de la adsorción de sulfatos ocurre en sitios con carga positiva (Probert y Samosir, 1983). En este proceso, al adsorberse el sulfato se liberan OH, como lo demostraron Chang y Thomas (1963) para el caso de Estados Unidos; Bornemisza y Llanos para Costa Rica (1967) y Couto, Lathwell y Bouldin para los Oxisoles de Brasil (1979) citados por Bornemisza (1990).

Para que se de una adsorción apreciable de sulfato, se requieren tres condiciones:

- la presencia de superficies que reaccionen
- la existencia de un ambiente químico favorable y
- la existencia de sulfato en solución del suelo.

Las cantidades de sulfato adsorbido pueden ser muy altas, especialmente cuando se abona fuertemente y cuando la concentración de sesquióxidos en el suelo es alta (Fox et al, 1983).

El movimiento del sulfato es fomentado por fosfatos y por el encalado (Chao et al, 1962); suelos altos en óxidos libres de Fe y Al son muy buenos retenedores de sulfatos.

Se han encontrado correlaciones positivas entre la adsorción con el contenido de materia orgánica, con óxidos de hierro y de aluminio; se hallaron correlaciones negativas con la suma de cationes intercambiables y con el calcio de estos suelos; también se encontró que la retención varía según el tipo de arcilla: caolinita > illita > bentonita (Malavolta, 1976; Tisdale y Nelson, 1977).

El movimiento de sulfatos en los suelos es reducido, aunque supera al del fosfato. Existen diferencias entre los tipos de suelos y una dependencia de la adsorción y de la concentración (Fox et al, 1983).

4.2.5 Interacción del azufre con otros elementos.

La interacción más importante es N:S, se sabe que aplicando juntos los dos elementos tienen una acción sinérgica, es decir la acción conjunta resulta en un mejor aprovechamiento de ambos elementos que si se les hubiera aplicado por separado. Sin embargo, si se suministran cantidades apreciables de uno de los dos elementos y el otro es escaso, las deficiencias serán fuertes. Esto se entiende considerando que tanto el nitrógeno como el azufre son partes fundamentales de las proteínas (Bomemisza, 1990; Kanwar y Mudahar, 1986).

Otra interacción de gran importancia es la de P:S; aquí debe considerarse el efecto desplazador del fosfato, especialmente si se aplica en grandes cantidades como es común para suelos volcánicos. Esto resultará en un aumento del lavado del sulfato y puede incluso conducir a deficiencias donde no se las observaba previamente. Kanwar y Mudahar (1986), indican que la aplicación conjunta de S y P resultó en efectos diferentes en caso de distintos cultivos, por ejemplo, interacciones positivas para algodón, soya, arroz y trigo, mientras que el efecto fue antagónico para lentejas y leguminosas. En general, hay más evidencia en India que indica que el

abonamiento con fósforo dificulta la absorción de sulfato. Esta absorción es muy importante para los trópicos de América, donde está aumentando apreciablemente el uso de fosfatos debido a la deficiencia común de este elemento. Como resultado, el aprovechamiento del azufre se vuelve menos eficiente y se presentan más deficiencias (Bornemisza, 1990; Kanwar y Mudahar, 1986).

Se ha informado sobre interacciones positivas azufre-potasio para arroz, pero investigaciones sobre interacciones de Ca:S y Mg:S no han indicado efecto alguno.

Bornemisza, 1990; Kanwar y Mudahar, 1986; han mencionado que las interacciones de sulfato con molibdeno y sulfato con selenato son negativas.

4.3 Azufre en la atmósfera.

La atmósfera contiene compuestos azufrados en forma gaseosa y de aerosoles. El gas dominante es SO_2 . En áreas próximas a los mares, los aerosoles costeros contienen sulfato sódico y otros sulfatos inorgánicos procedentes de las espumas marinas. En zonas sometidas al influjo de los humos urbanos e industriales, los aerosoles contienen sulfatos (especialmente sulfato amónico) y ácidos libres procedentes de la combustión de derivados petrolíferos con azufre. El arrastre de azufre por las lluvias es, en consecuencia, máximo en las proximidades de los centros industriales, donde pueden superarse los $100 \text{ Kg S ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. En Rothamsted, la cantidad anual arrastrada por las lluvias ha aumentado desde $7.8 \text{ Kg S ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (medidos durante 1881-87) hasta $20.6 \text{ Kg S ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (durante 1969-73) y recientemente ha llegado hasta $25\text{-}35 \text{ Kg S ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Valores obtenidos en zonas rurales de Nigeria y Nueva Zelanda, libres de contaminación atmosférica, están alrededor de $1 \text{ Kg S ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Goulding y Bromfield; 1985).

Las plantas obtienen de la atmósfera parte del azufre que necesitan. Olsen por ejemplo comprobó que plantas de algodón cultivadas en soluciones nutritivas marcadas con $^{35}\text{SO}_4^{2-}$

obtuvieron aproximadamente un 30% de su azufre a partir de la atmósfera. También se ha comprobado, mediante ensayos en cámaras de cultivo, que la exposición de plantas de raygrás inglés a atmósferas con $50 \text{ ug SO}_2 \text{ m}^{-3}$ reducía las consecuencias de un deficiente suministro de azufre por el suelo (Lockyer, 1976).

Se estima que la deposición seca se hace en forma de SO_2 , principalmente, y en mucha menor proporción como sulfato de los aerosoles. El azufre depositado en el suelo, procedente de la atmósfera, es absorbido por los cultivos y perdido por lixiviación y erosión, y solamente una pequeña parte puede volver a la atmósfera directamente. No se ha comprobado la existencia de un flujo de SO_2 desde los suelos o las plantas hacia la atmósfera, si se exceptúa durante los incendios. Aunque puede producirse pérdida de SH_2 u otros compuestos volátiles azufrados desde el suelo, las plantas y los estiércoles, está comprobado actualmente que esta pérdida es muy pequeña, incluso en los suelos en que se produce la reducción biológica del sulfato a SH_2 , ya que en estos suelos se forman SFe y otros sulfuros metálicos (Urbano y Rojo, 1992).

4.4. Azufre del agua de riego.

El agua de riego puede ser una fuente importante de azufre al suelo. Por ello, el monitoreo regular de la calidad de agua es esencial para determinar el suministro potencial de azufre por el agua de riego. En áreas irrigadas de trópicos semiáridos y zonas áridas, el suministro de azufre por el agua de riego puede ser adecuado para suelos pesados pero no para suelos de textura gruesa altamente permeables. Es así que la información sobre el volumen residual de sulfato, lixiviación de azufre e inmovilización de azufre con la materia orgánica del suelo deben ser examinados. Los modelos de simulación en los laboratorios son útiles pero resultados más valiosos sobre el suministro de agua de riego pueden ser obtenidos sólo por estudios de campo (Kanwar y Mudahar, 1986).

4.5 Fertilizantes que contienen azufre.

Los fertilizantes que contienen SO_4^{2-} tienen, generalmente, un efecto residual corto pero pueden mantenerlo en suelos ácidos que adsorben los iones sulfato, o cuando la lixiviación es pequeña (Bromfield, 1973; Jones, 1968). Los fertilizantes que contienen azufre elemental son, generalmente, algo menos activos, pero su efecto es más prolongado debido a la insolubilidad del azufre (Jones, 1966).

4.5.1 Flor de azufre.

A pesar de que es la fuente más concentrada del elemento, se utiliza poco azufre elemental como abono debido a que el azufre en polvo fino es un producto incómodo para manejar e incluso presenta un cierto riesgo de fuego y hasta de explosión (Hagstrom, 1986). Aún con estos inconvenientes, considerando las ventajas del producto y su fácil transporte, se han realizado una serie de investigaciones sobre el comportamiento del azufre elemento en suelos (Li y Caldwell, 1966; Navarro y Padda, 1983; Nor y Tabatabai, 1977; Starkey, 1966). Se sabe que los microorganismos del suelo tienen un papel fundamental en la oxidación del elemento (Starkey, 1966); un aumento de la temperatura del suelo favorece la oxidación del azufre elemental, igual como el pH cercano a la neutralización (Li y Cadwell, 1966; Nor y Tabatabai, 1977); no hay información sobre la velocidad de oxidación.

En experimentos con camote en un suelo bajo en azufre, Navarro y Padda en 1983 han obtenido aumentos significativos luego de la aplicación de azufre, tanto en forma elemental como en forma de sulfato de amonio.

De acuerdo con Blair (1979), el azufre elemental ha sido una de las fuentes importantes del elemento en los trópicos, aunque sea una fuente poco satisfactoria para arroz inundado. Se cree

que esto se debe a la reducción y su pérdida como ácido sulfhídrico. Mucho de este material se usa también para la recuperación de suelos afectados por altos niveles de Na.

4.5.2 Fertilizantes con Nitrógeno y Azufre.

El más conocido y utilizado es el Sulfato de Amonio, el cual, se obtiene en fábricas construidas para este propósito y como producto residual de diferentes procesos de la industria química, como la producción de nylon. Contiene 20 a 21% de N y un 24% de S calculado como elemento en forma de SO_4 . Este fertilizante se usa bastante y en grandes cantidades debido:

- 1.- contiene un total de 45% de nutrimentos;
- 2.- acidifica menos el suelo por unidad de azufre que el azufre elemental;
- 3.- es una fuente barata del azufre; ya que se vende principalmente en base del precio de N que contiene;
- 4.- suministra el S como sulfato y así en una forma inmediatamente disponible para las plantas;
- 5.- suple el N en forma de amonio, mucho menos expuesto a pérdidas que otras formas del elemento;
- 6.- se caracteriza por una baja higroscopicidad, lo que permite su almacenamiento en cualquier clima;
- 7.- se mezcla bien (Bornemisza, 1990; Hagstrom, 1986).

Villagarcía (1994) menciona que la ley del sulfato de amonio es 20.5% de N y 24% de S e indica que como todos los fertilizantes amoniacaes tienen una gran acción acidificante, debido a que la nitrificación convierte el ión amonio en ión nítrico y libera iones H. Por su contenido de azufre se recomienda para las crucíferas, liliáceas, algodón y leguminosas.

4.5.3 Fertilizantes con fósforo y azufre.

Tenemos el Superfos-24, el cual es obtenido por la fabrica INDUS mediante la mezcla de ácido sulfúrico con la roca fosfatada resultando en fosfato monocalcico [$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$] y yeso [CaSO_4] con restos de apatita hidroxidada, fosfatos de Fe y Ca, de acuerdo con la composición de la materia prima. Este fertilizante se presenta en forma granulada o pulverulenta, de solubilidad parcial en agua, poco o nada higroscópico lo que facilita su mezcla homogénea con otros fertilizantes nitrogenados y potásicos para su aplicación manual o mecanizada y de reacción neutra. Así mismo, es de acción rápida, su incorporación al suelo incrementa el contenido inicial de P_2O_5 en la solución suelo incrementando las reservas de iones PO_4 (Villagarcía, 1994; INDUS, s/a).

El superfos-24 contiene fósforo soluble en agua de inmediato aprovechamiento y fósforo soluble en ácidos débiles de progresiva disponibilidad con "gran efecto residual" para la nutrición fosfatada de los cultivos subsiguientes. Su composición es:

22 a 24% de fósforo expresado como P_2O_5 ; de los cuales:

- 10 a 12% es soluble en agua
- 10 a 12% es soluble en ácidos débiles
- 2 a 4% es soluble en ácidos fuertes

Además contiene:

23 a 25% de calcio

6 a 7% de azufre

Es decir, un total de 53 a 55% de nutrientes minerales entre fósforo, calcio y azufre.

Otro fertilizante es el superfosfato simple, que consiste en una mezcla de fosfato monocalcico [$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$] y yeso [$(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$] que contiene aproximadamente 8% de fósforo y de 12 a 14% de azufre. A pesar de que esta es la forma más barata de preparar un abono de fosfato soluble, por su bajo contenido de fósforo, está disminuyendo su importancia y su uso.

Otro fertilizante es el sulfato de potasio y magnesio : $K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$, es una excelente fuente de tres nutrimentos vegetales importantes. Las formas comerciales contienen alrededor de 18% de K, 11% de Mg y 22% de S (Hagstrom, 1986).

Muchos de los oligoelementos como el Zn, Cu, Mn, Ni se aplican cuando hacen falta como sulfatos. Sin embargo debido a que los niveles de requerimiento de estos elementos son bajos, las cantidades de azufre que aportan son también bajas, comúnmente inferiores a 5 Kg ha^{-1} .

4.5.5 El azufre en fertilizantes líquidos.

Los abonos líquidos de aplicación al suelos están ganando importancia en condiciones de agricultura mecanizada. Existen varios productos altamente especializados que se usan en Estados Unidos, los cuales aún no tienen importancia en Centro América. Los principales productos líquidos son (Bornemisza, 1990; Hagstrom, 1986; Kanwar y Mudahar, 1986):

1. Tiosulfato amónico $(NH_4)_2 S_2O_3$, un producto que permite formular muchos fertilizantes líquidos.
2. El polisulfuro de amonio $(NH_4)_2 S_4$, presenta más limitaciones de aplicación y más dificultades de manejo.
3. El sulfato ácido de amonio $(NH_4H SO_4)$ se puede combinar con otros fertilizantes líquidos y requiere más cuidado en su uso.
4. Mezclas de urea y ácido sulfúrico presentan solamente moderados problemas en su manejo. Se usan tanto para recuperar suelos salinos como para fuentes de nutrimentos.

4.5.6 Fertilizantes complejos con sulfatos.

Dentro de los fertilizantes complejos homogéneos de producción industrial existe una serie de fórmulas, las cuales contienen considerables cantidades de azufre en forma de sulfato. Debido al empleo de ácido sulfúrico o materias primas sulfatadas (por ejemplo sulfato de potasio, sulfato de magnesio) algunas fórmulas contienen hasta 10% de azufre.

Aplicando las dosis usuales de fertilizantes, alcanzan aproximadamente 3 a 5% de azufre en el abono complejo para asegurar el abastecimiento de azufre de los cultivos. Sin embargo, en la mayoría de los casos, el contenido de azufre no se declara en los sacos de envase.

Los fertilizantes complejos con azufre presentan por un lado una buena solución técnica de abastecimiento con azufre, ya que no es necesario una aplicación adicional y son aplicados en forma de fertilización de fondo justo al tiempo de desarrollo de las plántulas; también son de interés económico (Bornemisza, 1990).

4.5.7 El azufre en abonos orgánicos.

Los residuos de las cosechas son fuentes importantes de azufre. Es bastante común que los residuos contengan más azufre que las cosechas propiamente dicha. Los estiércoles son una fuente de azufre, sin embargo la amplia bibliografía sobre estos materiales, casi no ofrece información sobre su contenido de azufre y así es difícil estimar con precisión con cuánto azufre contribuyen.

En el Perú existen datos promedios del contenido de azufre en diferentes estiércoles:

Tabla 4. Composición química de estiércoles (Guerrero, 1993).

Estiércol	%M.S.	% N	% P ₂ O ₅	% K ₂ O	% CaO	%MgO	% SO ₄
En las deyecciones sólidas							
Vacuno	16	0.29	0.17	0.10	0.35	0.13	0.04
Caballos	24	0.44	0.35	0.35	0.15	0.12	0.06
Ovejas	35	0.55	0.31	0.15	0.46	0.15	0.14
Cerdos	18	0.60	0.41	0.28	0.09	0.10	0.04
En las deyecciones líquidas							
Vacuno	6	0.58	0.01	0.49	0.01	0.04	0.13
Caballos	10	1.55	0.01	1.50	0.45	0.24	0.06
Ovejas	13	1.95	0.01	2.26	1.16	0.34	0.30
Cerdos	3	0.43	0.07	0.83	0.01	0.08	0.08

También se sabe poco sobre la velocidad de mineralización de los compuestos de azufre en la materia orgánica, lo que hace más difícil estimar el valor preciso de estos materiales. Uno de los pocos datos es el indicado por Kanwar y Mudahar (1986) y por Blair (1979), quienes señalan que una tonelada de estiércol agrega alrededor de 2 Kg de azufre. Este se mineraliza lentamente, por ello únicamente adiciones fuertes de estos materiales pueden resultar en aumentos significativos de azufre en el suelo; además, Blair (1979) indica el mismo valor para harina de huesos y la mitad para harina de residuos de maní.

Evidentemente, su lenta mineralización también reduce la pérdida del azufre de esta fuente y así resulta en un aprovechamiento bastante eficiente del poco azufre añadido. Es importante recordar que la materia orgánica adsorbe a los sulfatos, y así en suelos bien suplidos de materia orgánica, hay menos pérdidas de lavado por este anión. Aunque esta área requiere mucha experimentación se puede afirmar que la materia orgánica en el suelo ayuda a reducir los problemas de azufre. Esto es confirmado por los experimentos realizados por Villagarcía et. al. (1997).

4.6 El cultivo de la Cebolla.

Es importante puntualizar que la cebolla en este trabajo de investigación se utiliza solamente como un cultivo indicador exigente en azufre, por tanto no se trata de ninguna experimentación relacionada con el cultivo en si, que amerite una mayor profundización en la revisión de literatura.

4.6.1 Ubicación taxonómica.

Hay autores que la ubican dentro de la familia Alliaceae y otros como Lileaceae. Pertenece al género *Allium* y a la especie *Allium cepa* L. Tiene como clave taxonómica AA-BB-CC-DD, donde:

AA: planta no rizomatosa

BB: hojas fistulosas

CC: bulbos bien desarrollados

DD: bulbos grandes no arraicimados.

Dentro de *Allium cepa* hay tres variedades botánicas:

- a) *A. cepa* L var. *typicum*, Regel: al cual pertenece la cebolla común, de bulbos grandes, simples, umbella típica y se reproduce por semillas verdaderas.
- b) *A. cepa* L var. *agregatum* G.: de bulbos compuestos.
- c) *A. cepa* L var. *viviparum*: de bulbos subterráneos, pequeños, no desarrollados.

4.6.2 Botánica morfológica.

Las raíces desarrollan pocos pelos absorbentes y constantemente nacen nuevas raíces en los primeros 30 centímetros, por ello la cebolla es exigente en una adecuada humedad en el suelo. El crecimiento radicular, es un proceso de tendencia continua, hasta la detención del crecimiento vegetativo y crecimiento del bulbo.

El tallo es discoidal y a diferencia del ajo, este no se muere al cosecharse los bulbos; se forman yemas vegetativas que prolongan la vida de la planta hacia su segundo período o fase reproductiva, de allí que la cebolla sea una especie de ciclo bienal. Manteniendo el frío los bulbos-madre, se logra que concluya la posdormancia y así después, formar su eje o escapo floral. El tallo floral es hueco y ensanchado en la parte central, pudiendo medir entre 0.8 y 1.2 metros.

Las hojas poseen vaina y limbo; este último es tubular, fistuloso y ceroso, ancho en el centro y fino en el ápice, tiene una cutícula cerosa y puede ser de color verde oscuro o verde claro. Sobre la epidermis tienen pruina, una sustancia parafínica que protege a la planta contra la sequía, heladas, además de ciertos hongos e insectos.

En las vainas se acumulan las sustancias de reserva que constituyen el bulbo. El crecimiento y formación de las hojas, es un proceso continuo durante la fase de desarrollo vegetativo de la planta, luego se hace más lento al desarrollarse el bulbo, etapa en que no se forman nuevas hojas; la tasa y eficiencia fotosintética disminuye y la translocación de los asimilatos se incrementa notablemente. En este momento el nivel de ácido abscísico (ABA) alcanza su máximo nivel y junto con los fotosintatos, empieza su descenso hacia las túnicas o catáfilas del bulbo. Todo esto significa, que hay necesidad de cuidar el desarrollo de las hojas, si se quiere una buena bulbificación y con ello una buena cosecha.

Toda hoja nueva, nace a través de un orificio que se abre entre el límite entre la vaina y la lámina sobre el tallo discoidal. Este crecimiento es de tal manera, que la vaina más externa envuelve al resto de vainas foliares llamadas catáfilas.

El bulbo de la cebolla se forma por ensanchamiento de la parte inferior de las vainas foliares, tornándose carnosas, estando recubiertos por medio de túnicas externas de color variable. En el bulbo se encuentran de afuera hacia adentro las siguientes túnicas o catáfilas:

- 6 a 7 túnicas membranosas muy delgadas, que son las vainas de las primeras hojas del follaje, que al crecer el bulbo se van distendiendo.
- 4 a 5 catáfilas carnosas, que son vainas engrosadas de las hojas que forman el follaje.
- 6 a 8 catáfilas carnosas, que son vainas engrosadas de hojas sin láminas, es decir, que se formaron después del comienzo de la bulbificación, ya que durante esta fase, no hay más aparición de hojas.
- 3 a 4 hojas no desarrolladas en el centro del tallo discoidal, las mismas que brotarán después en el segundo ciclo.

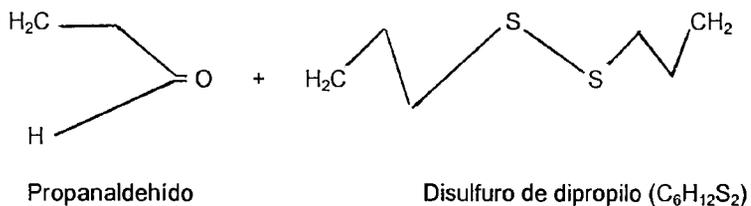
Un buen cultivar debe mostrar pocas yemas y un solo bulbo. Los bulbos se clasifican por su forma en globosos, deprimidos, discoidales, piriformes, turbinados, oblatos y cónicos entre otros. Las dimensiones para determinar la forma, vienen determinadas por la relación diámetro/altura. Sin embargo, este carácter es relativo y depende no sólo de la variedad, sino también de otros factores, como clima, suelo, fertilizantes, humedad, época de siembra y recolección.

Las túnicas externas pueden tener colores y tonos diferentes a las catáfilas internas; las cebollas blancas tienen las túnicas de color plata; las amarillas lucen escamas de color pajizo o amarillo verde pálido; las variedades rojas presentan túnicas de color rojo claro o rosado y rojo oscuro, hasta moradas. Las túnicas internas o catáfilas, por lo general tienen una coloración más clara que las externas.

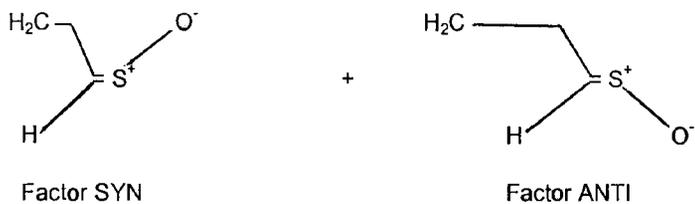
En cuanto a la consistencia, los bulbos pueden presentar túnicas o catáfilas de consistencia dura, media o blanda. Existe correlación entre el contenido de sólidos solubles y la consistencia de las catáfilas. Son variedades de consistencia dura por ejemplo los cultivares White Creole y Sothport White Globe con 18 a 20% de sólidos, en tanto que la Cebolla Roja Arequipeña es de consistencia media al presentar entre 11 y 13% de sólidos totales. Ambas características son importantes en la resistencia al transporte y conservación.

4.6.3 Química de la cebolla

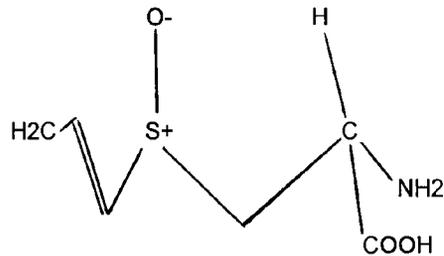
Los compuestos azufrados que se extraen de la cebolla, dependen de las condiciones de extracción. Por destilación al vapor (100°C) se logra propanaldehído y disulfuro de dipropilo:



Empleando freón disuelto en agua a 0°C, se extrae el factor lacrimógeno en sus formas SYN y ANTI, predominando el primero en las cebollas fuertes.



Con alcohol etílico por debajo de 0°C, se extrae el precursor lacrimógeno, que es un isómero de la ALIINA. Luego una enzima transforma este precursor en el factor lacrimógeno.



Precursor lacrimógeno (isómero de Aliina)

El olor y sabor característico de la cebolla se debe al disulfuro de dipropilo, estructurado como isopropeno y presente en los aceites volátiles de los jugos de la planta.

La cebolla por ser una especie de metabolismo ácido, en la oscuridad los carbohidratos almacenados se convierten en fosfoenol piruvato por la glicólisis, que se carboxila dando ácido málico, el cual se almacena en la vacuola. A la luz, el malato se descarboxila para dar ácido pirúvico ($\text{CH}_3\text{-CO-COOH}$) y CO_2 . El CO_2 se utiliza en la fotosíntesis y el ácido pirúvico puede transformarse en Acetil-CoA para producir energía como ATP. La disminución rápida del ácido pirúvico en las hojas luego del crecimiento del bulbo, se debe a su translocación y almacenamiento en estos órganos, siendo después aprovechado como fuente de energía probablemente por activación del piruvato deshidrogenasa.

En los bulbos almacenados el ácido pirúvico producido, se acumula debido a que las células no requieren mucha energía y también a que con la marchitez, el almidón se transforma en azúcares, como la glucosa y esta en ácido pirúvico. Su contenido por lo tanto variará con los cultivares que tengan más o menos sólidos totales y con la pungencia.

El elemento que da el sabor más o menos acre o pungencia, es el disulfuro de dipropilo, terpeno que se encuentra en el aceite volátil de la cebolla. Las variedades muy pungentes o de sabor muy fuerte, contiene el mayor porcentaje de sólidos totales, siendo preferidas para la deshidratación (pluma, escamas, polvo, etc) y para la preparación de extractos, productos que a su vez se emplean en la elaboración de salsas, sopas, etc.

La determinación de la pungencia, puede hacerse directamente analizando el contenido de estos compuestos azufrados o indirectamente a través del ácido pirúvico (Carson y Wong, 1961; mencionados por Carrillo, 1989 ; Todd, 1994).

4.6.4 La nutrición mineral y la fertilización de la cebolla.

La cebolla ocupa el segundo lugar en importancia económica mundial dentro de las hortalizas, con una superficie de 1'808,000 hectáreas y su producción es de 26'319,000 toneladas, con un rendimiento promedio de 13.9 t ha⁻¹.

En el país se cultiva 35 a 40 mil hectáreas de cebolla roja, siendo Arequipa uno de los departamentos con mayor hectareaje, productividad y producción con rendimientos que superan las 40 a 60 t ha⁻¹ como ocurre en los valles de Majes, Camaná, Chili, etc. Hace pocos años que se dio inicio a la cebolla dulce para exportación en el cual se evita o minimiza el uso de azufre o suelos provistos en azufre. (Villagarcía, 1997).

El mayor ritmo de crecimiento en la cebolla de trasplante se da luego del primer mes del cultivo, lo que coincide con el período de máximo requerimiento de nutrientes y de acumulación de materia seca, este período coincide además con la etapa de desarrollo y maduración de los bulbos; además con respecto al efecto de las distintas dosis de fertilización en la concentración de nutrientes, solamente se observan diferencias significativas en el caso del nitrógeno en bulbos (Carrillo, 1989).

El cultivo de cebolla para producir una tonelada de bulbos (cosecha económica) necesita extraer del suelo:

- 3 a 4 Kg de N.
- 1.5 a 2 Kg de P.
- 7 Kg de K.
- 1.1 Kg de S.
- 0.6 a 0.8 Kg de Ca.
- 0.6 a 0.8 Kg de Mg.
- 80 a 100 g de Fe.
- 20 a 40 gr de Mn.
- 15 a 50 gr de Zn.
- 2 a 5 gr de Cu.
- 12 a 35 gr de B.
- 2 a 5 gr de Mo.

Las variaciones de la cantidad extraída de nutrientes minerales por la cebolla y papa dependen de la riqueza natural del sustrato, de la fertilización practicada y de la variedad sembrada. Por ejemplo, en suelos bien provistos de NPK ya sea porque los suelos son ricos por naturaleza o porque fueron suficientemente fertilizados, en los tejidos vegetales de los cultivos habrá mayor concentración de estos elementos y la cantidad extraída por unidad de producción será más alto. Una adecuada fertilización incrementará la producción en cantidad y en calidad, con una mayor concentración de proteínas, vitaminas, otros. En suelos ácidos la disponibilidad de elementos menores (excepto Mo) generalmente es mayor; mientras que en suelos calcáreos los elementos menores se encuentran en forma oxidada, es decir menos disponibles para la planta; todo esto se va a reflejar en los tejidos de las plantas por lo que es recomendable analizar las características físicas y químicas del suelo para determinar cuanto más se requiere añadir al suelo de los nutrientes, en función de la cosecha que deseamos obtener, mediante la fertilización.

Generalmente, la fertilización se limita a los macroelementos primarios (NPK) y raras veces se incluyen a los macroelementos secundarios (Ca, Mg, S) debido a que los suelos cultivados generalmente son suficientes en estos elementos y en caso de que no lo fueran se eligen fertilizantes nitro-fosfo-potásicos que adicionalmente los contengan en su composición; por ejemplo: Sulfato de Amonio, Superfosfato Simple de Calcio, Superfos-24, Sulfato de Potasio, SULPOMAG, fertilizantes compuestos como el 20-15-15 + 3MgO + 7S; 14-14-14 + 11S, etc.

En cuanto a microelementos rara vez el agricultor se preocupa de la aplicación de estos debido a que los requerimientos son muy pequeños y por lo común los suelos los tienen en cantidad suficiente como para permitir una alta cosecha de lo contrario se acostumbra suplirlos vía fertilización foliar.

4.7 El Cultivo de Papa

Al igual que en la cebolla el cultivo de papa se utiliza como cultivo indicador para evaluar la necesidad de aplicar o no aplicar el azufre ya sea directa o indirectamente con los fertilizantes nitrofosfopotásicos azufrados; es decir no se trata de ninguna investigación relacionada con el fitomejoramiento del cultivo de papa razón por la cual su revisión de literatura se limita mayormente a la nutrición mineral de la papa.

4.7.1 Taxonomía del cultivo

La papa se clasifica taxonómicamente de acuerdo a sus características florales en:

Reino	:	Vegetal
División	:	Fanerógamas
Subdivisión	:	Angiosperma
Clase	:	Dicotiledónea
Subclase	:	Simpétala
Orden	:	Tubiflora
Familia	:	Solanácea
Género	:	<u>Solanum</u>
Sección	:	Petota
Serie	:	<u>tuberosa</u>

4.7.2 La nutrición mineral y la fertilización de la papa

Villagarcía (1987) informa que dentro de una agricultura tecnificada, el cultivo de la papa es considerada como uno de los cultivos de más alta densidad económica. El gasto en fertilizantes representa el 20 al 30% del costo de producción y es por ello que el agricultor requiere la información más precisa en sus interrogantes de cuánto, qué, cuándo y cómo abonar, considerando los cuatro factores de producción que son clima, suelo, cultivo y grado de tecnificación.

El mismo autor señala que el cultivo de papa para producir una tonelada de tubérculos (cosecha económica) necesita extraer del suelo:

- 4 a 6 Kg de N.
- 0.7 a 1.1 Kg de P.
- 6 a 7.5 Kg de K.
- 0.6 a 0.8 Kg de S.
- 0.6 a 0.8 Kg de Ca.
- 0.6 a 0.8 Kg de Mg.
- 80 a 120 g de Fe.
- 12 a 60 gr de Mn.
- 12 a 60 gr de Zn.
- 2 a 6 gr de Cu.
- 12 a 40 gr de B.
- 2 a 6 gr de Mo.

V. MATERIALES Y METODOS

5.1 Materiales

5.1.1 Lugar de Ejecución

Los experimentos de invernadero se realizaron en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos de la UNALM, cuya ubicación geográfica es:

Latitud Sur: 12°05'06"

Longitud Oeste: 76°57'00"

Altitud: 238 m.s.n.m.

Los experimentos de campo se realizaron en el departamento de Arequipa en las localidades de Bajo Cural y Revuelta-Perdida-Vitor-Cailloma.

5.1.2 Datos de Clima

La información para los experimentos de invernadero fue obtenida de la Estación Meteorológica Von Humbolt de la UNALM y se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Datos meteorológicos registrados en la estación Von Humbolt.

	Noviembre-96	Diciembre-96	Enero-97	Febrero-97
T. máxima (°C)	21.9	24.8	27.0	28.7
T. mínima (°C)	14.7	17.1	19.3	19.9
T° prom 24 hrs	17.4	20.1	22.6	23.8
Horas de sol	4.7	6.5	9.2	8.0
%HR máxima	95	94	95	93

%HR mínima	69	63	59	52
%HR prom 24hr	86	82	80	74
PPT (mm)	0	0	0	0

HR : Humedad Relativa

PPT : Precipitación Pluvial Total

La información de campo se obtuvo por lo observado durante la campaña y se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro 2. Datos climatológicos registrados en la campaña 1997.

	Cebolla	Papa
Altitud (msnm)	1200	2250
Temperatura (°C)	19	19
Precip. Pluvial (mm)	< 20	8
Sistema	riego	riego

5.1.3 Características de los suelos

El análisis de caracterización de los dos suelos empleados en los experimentos de invernadero fue realizado en el Laboratorio de Análisis de Suelos y Plantas de la UNALM, usando los métodos convencionales. Los resultados tanto de invernadero y campo de los suelos como de la materia orgánica (estiércol de vacuno proveniente del establo de ganado de engorde de la UNALM) y agua se muestran en los cuadros 3, 4, 5 y 6 respectivamente.

Cuadro 3. Análisis de caracterización de los suelos de invernadero.

	Entisol	Inceptisol
Procedencia	Cieneguilla	Sicaya
Arena, limo y arcilla (%)	94-6-0	40-36-24
Textura	Arena	Franco
C.E. (dS m ⁻¹)	0.49	0.64
pH	7.50	7.80
CaCO ₃ (%)	0	1.33
M.O (%)	0.07	1.18
P (ppm)	2.20	20.3
K ₂ O (Kg ha ⁻¹)	207	830
S - SO ₄ (ppm)	20.06	62.32
CIC [cmol(+) Kg ⁻¹]	4.0	29.40
Ca [cmol(+) Kg ⁻¹]	3.1	24.93
Mg [cmol(+) Kg ⁻¹]	0.64	3.19
K [cmol(+) Kg ⁻¹]	0.14	1.13
Na [cmol(+) Kg ⁻¹]	0.12	0.15

Los suelos de los experimentos de campo se evaluaron 'in situ' y también se analizaron en el Laboratorio de Análisis de Suelos y Plantas de la UNALM y presentaron las siguientes características:

Cuadro 4. Características de los suelos de experimentos de campo.

	Cebolla	Papa
Localidad	Revuelta-Perdida-Vitor-Cailloma	Bajo Cural
Capacidad de uso	A ₁ C ₁	A _{2r}
Soil Taxonomy	Fluvisol salino	Entisol
Textura	Franco arenoso	Arena franca
pH	7,7	6,1
% MO	0.88	1,18
P ppm (Olsen)	9,4	76
K ₂ O kg/ha	1197	1725
CE (dS/m)	5,27	3,17

Métodos seguidos en el análisis

1. Análisis mecánico: Textura por el método del Hidrómetro.
2. pH: Método del potenciómetro, relación suelo agua 1:1
3. C.E : Lectura del extracto de relación suelo-agua 1:1 en un conductímetro.
4. Calcáreo total: Método gaso-volumétrico
5. Materia orgánica: Método de Walkley y Black; %MO=%C x 1.724
6. Fósforo: Método de Olsen modificado. Extracto NaHCO₃ 0.5M, pH 8.5
7. Potasio: Extracto Acetato de Amonio 1N, pH 7.0
8. Capacidad de Intercambio Catiónico: Método del Acetato de Amonio 1N, pH 7.0
9. Cationes Cambiables: Determinaciones en extracto amónico
 - Ca: Espectrofotometría de Absorción Atómica
 - Mg : Espectrofotometría de Absorción Atómica
 - K : Espectrofotometría de Absorción Atómica
 - Na: : Espectrofotometría de Absorción Atómica
10. Acidez cambiante: Método del KCl 1N.

Cuadro 5. Análisis de Estiércol de vacuno realizado en el Laboratorio de Análisis de Suelos y plantas de la UNALM.

M.O (%)	45.27
C.E. (dS m ⁻¹)	39.89
Humedad (%)	5.35
PH	7.8
N (%)	1.12
P ₂ O ₅ (%)	0.92
K ₂ O (%)	1.36
CaO (%)	1.65
MgO (%)	0.53
SO ₄ (%)	1.29

Cuadro 6. Análisis de agua del Laboratorio de Fertilidad de Suelos realizado por el Laboratorio de Análisis de Suelos y Plantas de la UNALM.

C.E. (dS m ⁻¹)	1.04
PH	7.5
Ca (meq/l)	6.37
Mg (meq/l)	1.28
Na (meq/l)	1.81
K (meq/l)	0.10
Suma de Cationes (meq/l)	9.56
NO ₃ (meq/l)	0.8
Bicarbonatos (meq/l)	2.58

SO ₄ (meq/l)	3.54
Cl (meq/l)	3.31
Suma de aniones (meq/l)	10.23
Na (%)	18.93
SAR	0.92
B (ppm)	1.4
Clasificación	C3-S1

El análisis de agua nos indica que su contenido de sales es medio-alto (C3) y que podría ocasionar problemas en el cultivo dependiendo del tipo de sales, del suelo y sensibilidad del cultivo ante las sales, la concentración de sales es de 665 ppm siendo el contenido de sulfatos de 170 ppm. En cuanto al rango de adsorción de sodio (SAR) no hubo problemas ya que se encuentra dentro del límite bajo (S1).

5.1.4 Características de los cultivos

Se empleó la cebolla roja arequipeña como cultivo indicador a los tratamientos aplicados en invernadero y la cebolla roja americana y papa cultivar revolución como cultivos indicadores en los tratamientos de campo.

La cebolla, como todo cultivo, tiene una capacidad productiva dependiente de su potencial genético, del clima, suelo y manejo agronómico. Un índice de calidad en la cebolla es el grado de pungencia, el olor y el factor lacrimógeno todos ellos están relacionados directamente con los compuestos azufrados que tiene la cebolla y que a su vez son el reflejo del contenido de azufre que existe en el suelo en el cual crecen.

En el caso de la papa como en otro cultivo, el azufre está relacionado con el valor proteínico del producto cosechado y por lo tanto en su calidad. Experimentos realizados por

Villagarcía y otros en 1997 durante la campaña afectada por el Fenómeno del Niño en Huasahuasi mostraron que aquellos tratamientos con fertilizantes que contenían azufre resistían mejor al fuerte ataque de "Rancho" permitiendo un mejor rendimiento y observándose una mejor calidad de los tubérculos cosechados; algo similar se observó en leguminosas donde las enfermedades radiculares (*Phytophthora*) disminuyeron ante la presencia de azufre.

5.1.5 Fertilizantes empleados

Los fertilizantes empleados fueron simples y se comparó aquellos más concentrados con otros que contenían azufre en su composición además del macroelemento primario (ver cuadro 5).

Cuadro 5. Fertilizantes empleados:

Fertilizante	%N	%P ₂ O ₅	%K ₂ O	% azufre
U	45-46	0	0	0
S.A	20-21	0	0	24
S.T	0	46	0	0
SF-24	0	22-24	0	6-7
CIK	0	0	60-62	0
S.K	0	0	48-52	18
Flor de azufre	0	0	0	98-100

U : Urea $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$

SA: Sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (95 a 98%)

ST: Superfosfato triple de calcio $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ (95%)

SF-24: Superfos 24 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{PO}_4)_3$

CIK: Cloruro de potasio CIK (95 – 98%)

SK: Sulfato de potasio K_2SO_4 (95-98%)

5.1.6 Reactivos empleados

Para analizar el contenido de azufre en los bulbos de cebolla cosechados en invernadero se utilizaron los siguientes reactivos:

ácido nítrico

ácido perclórico

cloruro de bario (ClBa) dihidratado

5.1.7 Equipos

Estufa marca MIM húngara de 0 - 110°C.

Balanza de platillo marca OHAUS de 0.01 g de precisión con capacidad de 600 g y aproximación de 2 decimales.

Plancha caliente marca Thermoline Type 2200 de 0 -700°C

Balanza analítica marca Sauter August GmbH D7470 de 50mg a 200g

Espectrofotómetro de absorción marca Baush & Lomb Spectric 20 con longitud de onda de 340 - 960 nm (Análisis de S-SO₄ turbidimétrico 420 nm).

5.2 Metodología

5.2.1 Fase de invernadero

Preparación de macetas.- Se colocaron 4.0 Kg de suelo por maceta en 78 macetas para suelo arenoso y 78 macetas para suelo franco (26 tratamientos con 3 repeticiones cada uno) con los fertilizantes y materia orgánica correspondientes a los tratamientos (ver cuadro 6) excepto el nitrógeno, el cual se aplicó fraccionado en tres partes. La aplicación del fertilizante con azufre en forma directa consistió en agregar al suelo 100 ppm de azufre QP, mientras que la aplicación indirecta consistió en aplicar fertilizantes que contienen azufre como elemento secundario y el uso de materia orgánica como enmienda. La dosis de fertilización fue de 160-160-80.

Cuadro 6. Tratamientos de experimentos de invernadero

Tratamiento	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	M.O	S
1	U	ST	CIK	0	0
2	U	ST	CIK	0.5%E.V	0
3	U	ST	SK	0	0
4	U	ST	SK	0.5%E.V	0
5	U	SF-24	CIK	0	0
6	U	SF-24	CIK	0.5%E.V	0
7	U	SF-24	SK	0	0
8	U	SF-24	SK	0.5%E.V	0
9	SA	ST	CIK	0	0
10	SA	ST	CIK	0.5%E.V	0
11	SA	ST	SK	0	0
12	SA	ST	SK	0.5%E.V	0
13	SA	SF-24	CIK	0	0
14	SA	SF-24	CIK	0.5%E.V	0
15	SA	SF-24	SK	0	0
16	SA	SF-24	SK	0.5%E.V	0
17	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0.5%E.V	0
19	0	ST	CIK	0	0
20	0	ST	CIK	0.5%E.V	0
21	U	0	CIK	0	0
22	U	0	CIK	0.5%E.V	0
23	U	ST	0	0	0
24	U	ST	0	0.5%E.V	0
25	U	ST	CIK	0	100ppm
26	U	ST	CIK	0.5%E.V	100ppm

U: Urea

SA: Sulfato de amonio

ST: Superfosfato triple de calcio

SF: Superfos 24

SK: Sulfato de potasio

KCl: Cloruro de potasio

S : Flor de azufre

M.O: Materia orgánica

E.V: Estiércol vacuno

Siembra y riego.- El 09 de noviembre de 1996, se sembraron 10 semillas de cebolla roja arequipeña por maceta cubriéndose con pajilla de arroz, manteniéndose en todo momento el suelo a capacidad de campo.

Cosecha.- Terminada la fase del cultivo en aproximadamente 4 meses, el 27 de febrero de 1997, se cosecharon por separado las hojas, bulbos y raíces de la cebolla roja arequipeña, las cuales fueron lavadas primero con agua de caño para eliminar impurezas y luego con agua desionizada.

5.2.2. Fase de Laboratorio

Las muestras frescas se llevaron a estufa a 70°C, una vez secas se tomaron los pesos respectivos y se procedió a moler las muestras para finalmente realizar el análisis de sulfato en la materia seca de los bulbos por el **método turbimétrico** en el laboratorio de análisis de suelo.

Este análisis se realizó de la siguiente manera:

Se pesaron 0.5 gramos de muestra seca molida a la cual se añadió 5 ml de ácido nítrico (HNO_3 QP), se calentó en plancha a una temperatura entre 200-250°C hasta conseguir una ligera sequedad de la muestra, se dejó enfriar. Se agregaron 5 ml de ácido perclórico (HClO_4 QP) en plancha caliente hasta lograr una ligera sequedad y la desaparición de vapores nitrosos, se dejó enfriar. Finalmente se llevó a un volumen de 50 ml con agua destilada y se guarda este extracto.

Paralelamente se calentó agua destilada a 60 - 70°C (más o menos 100 ml) a la cual se añadió 100 mg de gelatina para análisis microbiológico y 12.5 gramos de Cloruro de Bario dihidratado ($\text{ClBa} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Se homogenizó el reactivo y se llevó a volumen de 1 litro con agua destilada.

Finalmente se tomaron alícuotas de 10 ml de los extractos y se agregaron 10 ml del reactivo de cloruro de bario dihidratado ($\text{ClBa} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Se completó a un volumen final de 50 ml

con agua destilada en los tubos de ensayo. Se agitó y dejó reposar por 30 minutos. Al mismo tiempo se preparó la curva estándar con 0, 2, 4, 8, 16, 32 y 64 ppm de S-SO₄ a partir de una solución de trabajo de 100 ppm de S-SO₄. Finalmente se procedió a leer en el colorímetro en longitud de onda a 420 nm.

5.2.3. Fase de Campo

Delimitación del campo experimental

Considerando las características del suelo se delimitó el campo experimental teniendo en cuenta el número de tratamientos. Cada tratamiento tuvo 3 parcelas o repeticiones y cada parcela tuvo 4 surcos distanciados entre sí un metro y con una longitud de 6 metros lo que determina un área de 24 m². El área experimental teniendo en cuenta el distanciamiento entre bloques y bordes fue aproximadamente de 900 m² para cada experimento. Para la delimitación se usó una wincha, cordel, estacas y yeso y en todo momento se trató de mantener uniformidad en las parcelas.

Siembra y abonamiento

La siembra del cultivo de cebolla fue el 12 de junio de 1997 y la del cultivo de papa el 21 de julio de 1997. El día de la siembra se realizó el abonamiento de 1/2N, P y K según los tratamientos, el resto de N se aplicó en el momento del aporque. En el caso de la cebolla la dosis de abonamiento fue de 240-200-160 y 10t de estiércol a la siembra, mientras que el de la papa fue 240-240-120; ello debido a que en todo momento se siguió la metodología de trabajo del agricultor.

Cosecha

Se efectuó en el cultivo de cebolla el 12 de noviembre de 1997 y en el cultivo de papa fue el 27 de diciembre de 1997. Se cosecharon las plantas de los dos surcos centrales de cada parcela de 4 surcos para evitar el efecto de borde entre los tratamientos, luego se pesó en una balanza para obtener el rendimiento total extrapolando a una hectárea.

Factores en estudio

Factor N: Urea (45-46%N) y Sulfato de Amonio (21%N, 24%S)

Factor P: Superfosfato triple de calcio (46%P₂O₅) y Superfos-24 (24% P₂O₅, 8%S)

Factor K: Cloruro de potasio (60% de K₂O) y Sulf. de Potasio (50 % de K₂O, 21%S)

Cuadro 7. Tratamientos de experimentos de campo.

Tratamiento	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	U	ST	CIK
2	U	ST	SK
3	U	SF-24	CIK
4	U	SF-24	SK
5	SA	ST	CIK
6	SA	ST	SK
7	SA	SF-24	CIK
8	SA	SF-24	SK
9	0	0	0
10	0	ST	SK
11	U	0	SK
12	SA	ST	0

U: Urea

SA: Sulfato de amonio

ST: Superfosfato triple de calcio

SF: Superfos 24

SK: Sulfato de potasio

KCl: Cloruro de potasio

5.3 Diseño estadístico.

En los experimentos de invernadero se evaluó el efecto de la fertilización con azufre en forma directa e indirecta en 26 tratamientos con 3 repeticiones; estos tratamientos se realizaron simultáneamente en dos substratos de suelos. Para cada substrato de suelo se utilizó el diseño completamente al azar con arreglo factorial de $2 \times 2 \times 2 \times 2$ (2 fuentes de nitrógeno, 2 de fósforo, 2 de potasio y 2 de materia orgánica) más 10 tratamientos adicionales.

En los experimentos de campo se utilizó el mismo diseño experimental con arreglo factorial de $2 \times 2 \times 2$ (2 fuentes de nitrógeno, dos de fósforo y dos de potasio) más 4 tratamientos adicionales.

Tanto en los experimentos de campo como invernadero hubieron 3 repeticiones, con los datos de peso en invernadero (gr maceta^{-1}) y rendimiento (t ha^{-1}) en campo se realizó en análisis de variancia (ANVA) y el análisis de los efectos de primero, segundo y tercer orden para mejor interpretación de los resultados. Se utilizó la prueba estadística de DLS (0.05) para determinar el nivel de significación entre los tratamientos.

VI. RESULTADOS Y DISCUSION

6.1 RESULTADOS INVERNADERO

6.1.1 EFECTOS DE PRIMER ORDEN

En los cuadros 1 y 2 se observan los efectos principales de N, P, K y MO para sustrato arenoso y franco respectivamente. Asimismo, los gráficos 1, 2, 3 y 4 muestran los mencionados efectos. En general observamos que el mayor peso seco se obtuvo en el suelo franco siendo los valores más del doble comparado con el suelo arenoso, ello debido a que el suelo de textura franco tiene un mayor porcentaje de arcilla, un menor porcentaje de materia orgánica por tanto una mayor CIC y en consecuencia una mayor adsorción de cationes por el complejo arcillo húmico hasta la solución suelo manteniendo un equilibrio entre ambos procesos. Asimismo en el suelo arenoso la tercera parte del peso total eran bulbos mientras que en el suelo franco la mitad del peso total correspondían a los bulbos.

6.1.1.1 Efecto primario del Nitrógeno

El nitrógeno se encuentra en cantidad insuficiente en el suelo debido a que el contenido de materia orgánica del suelo es baja (0.07% en suelo arenoso y 1.18% en suelo franco) y en consecuencia una baja tasa de nitrógeno mineral es obtenida a partir de la mineralización de la materia orgánica lo cual no satisface los requerimientos extractivos del cultivo; por ello, se observa que el mayor peso seco de bulbos y total se obtuvo al usar fertilizantes nitrogenados con incrementos de más de 200% para la urea en ambos sustratos y más de 240% y 180% para el sulfato de amonio (sustrato arenoso y franco respectivamente) comparado con el testigo absoluto (0-0-0) y testigo con el elemento faltante nitrógeno (0-P-K).

A igual dosis de fertilización de nitrógeno (160 ppm), se observó en el sustrato arenoso el cual contenía 20 ppm de sulfatos, que el fertilizante nitrogenado que contiene azufre (sulfato de amonio) dio mayor peso seco total y se observó un mayor tamaño de los bulbos; es decir, el efecto del azufre incrementó el peso seco y la calidad de los bulbos. En el sustrato franco sin embargo el mayor peso seco total se obtuvo con la urea probablemente debido al contenido de sulfatos en el suelo (62.3 ppm).

6.1.1.2 Efecto primario del fósforo

En ambos sustratos, el mayor peso seco de bulbos y total se obtuvo al usar superfosfato triple de calcio (ST) debido a la mayor solubilidad ya que del 42 al 50% total de fósforo un 40 a 49% del fósforo se haya en forma asimilable como ortofosfato monocálcico soluble en agua; mientras que en el superfos-24 del 20 a 24% de fósforo total que posee sólo un 10 a 12% es asimilable como ortofosfato monocálcico soluble en agua.

Debido a la diferencia en cuanto a la cantidad de fósforo soluble en agua aportado por los fertilizantes, la velocidad de disolución y las características de reacción en el suelo es que el superfosfato triple de calcio superó al superfos-24.

Al comparar los tratamientos con fertilizantes fosforados con los testigos absoluto y sin fósforo se observaron incrementos de más de 200% para el ST en sustrato arenoso debido a las características químicas inherentes a la clase textural (bajo contenido de fósforo: 2.2 ppm); en el sustrato franco hubo incrementos en más de 200% al usar ST con respecto al testigo absoluto e incrementos en un 146% al usar ST versus tratamiento sin P debido a que el sustrato tenía fósforo (20.3 ppm).

6.1.1.3 Efecto primario del potasio

En ambos substratos el mayor peso seco de bulbos y total se obtuvo al usar como fuente potásica al sulfato de potasio por el aporte de sulfatos. El análisis de suelo reportó un contenido de 207 kg/ha de potasio para el substrato arenoso y 830 kg/ha de potasio para el substrato franco, debido a ello se observó una respuesta más significativa en el substrato arenoso.

La literatura reporta que algunos cultivos entre ellos tabaco y papa toleran mal el cloruro por lo que se recomienda el uso de sulfato de potasio.

Ambas fuentes de potasio superaron al testigo absoluto (0-0-0) en más del 200%. En el substrato arenoso los fertilizantes potásicos superaron al testigo con el elemento faltante potasio (N-P-0) mientras que en el substrato franco el sulfato de potasio superó al testigo sin potasio lo cual nos indica que el cultivo está aprovechando una pequeña aplicación de sulfatos dado por este fertilizante, el efecto del cloruro de potasio no se observó debido al contenido de potasio en el substrato proveniente de minerales primarios y de las arcillas.

6.1.1.4 Efecto primario del estiércol

El efecto positivo de la materia orgánica sólo se observó en el substrato arenoso tanto en el peso seco de los bulbos como en el total, ello debido a la pobreza en materia orgánica del suelo y a los beneficios que implican su uso: mejorador de propiedades físicas como retención de humedad, químicas como aportador de nutrientes (más del 90% de sulfatos) y biológicas como incrementar la actividad microbiana, etc.

En el caso del substrato franco no hubo diferencia en el peso seco de bulbos y total debido al contenido medio de materia orgánica en el suelo, a la riqueza del substrato en el contenido de nutrientes comparado con el substrato arenoso y al corto periodo vegetativo del cultivo que no

permitió observar los beneficios del estiércol lo cual si se observó en el siguiente cultivo (maíz) en rotación.

Un suelo arenoso se califica como carente de estructura o con estructura granular suelta, por lo que el porcentaje de agregados es muy bajo por el pequeño contenido de arcilla y materia orgánica, es por ello que existe respuesta inmediata a la aplicación de estiércol por mejorar la estructura del suelo o "darle un mejor cuerpo", en cambio, un suelo franco como el del experimento tiene un contenido medio de materia orgánica y de arcilla y en este caso tiene carbonatos por lo que su estructura es mejor comparado con el suelo arenoso existiendo un mayor porcentaje de agregados.

6.1.1.5 Efecto primario de la flor de azufre

En el suelo arenoso hubo respuesta a la aplicación de flor de azufre debido a que estos suelos tienen un bajo contenido de materia orgánica, un bajo porcentaje de arcilla por lo tanto tiene un bajo contenido de azufre por lo que responden ante la aplicación de este elemento. En este suelo, la aplicación de 100ppm de flor de azufre tuvo un efecto semejante a la aplicación de dos fuentes indirectas de azufre por ejemplo el tratamiento 11 (SA y SK) y el tratamiento 8 (SK y MO, el SF-24 no es considerado porque constituye una limitante del fósforo). Los microorganismos tienen un papel fundamental en la oxidación de este producto, en este experimento se observó la tendencia hacia un mayor contenido de materia seca cuando se aplicó estiércol aunque las diferencias no fueron significativas.

En el suelo franco no hubo respuesta a la flor de azufre porque el alto porcentaje de arcilla y el contenido medio de materia orgánica le dan un contenido medio de sulfatos que junto con los sulfatos provenientes del agua de riego fueron suficientes para el cultivo; en este caso la aplicación del azufre en flor ocasionó un exceso de sulfatos en el suelo.

Cuadro 1. Efectos de primer grado del ensayo factorial de N-P-K-MO en un suelo arenoso en el cultivo de cebolla roja arequipeña bajo condiciones de invernadero.

SUELO	ENTISOL	
<u>EFFECTOS PRINCIPALES</u>	Rendimiento g/mac	
	Bulbo	Total
1. NITROGENO		
Testigo 0-0-0	1.6	5.7
Testigo 0-P-K	2.6	7.3
Urea	3.9	11.6
Sulfato de Amonio	4.9	13.8
2. FOSFORO		
Testigo 0-0-0	1.6	5.7
Testigo N-0-K	1.7	6.1
S.T	4.7	13.0
SF-24	4.1	12.5
3. POTASIO		
Testigo 0-0-0	1.6	5.7
Testigo N-P-0	2.9	10.7
CIK	4.3	11.8
S.K	4.4	13.6
4. MATERIA ORGANICA		
0.	3.9	11.6
0.5	4.9	13.8
5. FLOR DE AZUFRE		
0 ppm	4.4	11,6
100 ppm	4.8	13,8
(%) CV	9,7	8,2

Cuadro 2. Efectos de primer grado del ensayo factorial de N-P-K-MO en un suelo franco en el cultivo de cebolla roja arequipeña bajo condiciones de invernadero.

SUELO	INCEPTISOL	
EFFECTOS PRINCIPALES	Rendimiento g/mac	
	Bulbo	Total
1. NITROGENO		
Testigo 0-0-0	7.0	13.7
Testigo 0-P-K	8.4	17.5
Urea	11.3	28.3
Sulfato de Amonio	10.5	25.8
2. FOSFORO		
Testigo 0-0-0	7.0	13.7
Testigo N-0-K	9.0	20.5
S.T	12.6	30.0
SF-24	9.2	24.5
3. POTASIO		
Testigo 0-0-0	7.0	13.7
Testigo N-P-0	10.6	26.6
CIK	10.5	26.5
S.K	11.3	27.7
4. MATERIA ORGANICA		
0.	11.1	27.3
0.5	10.7	26.8
5. FLOR DE AZUFRE		
0 ppm	13.2	27.4
100 ppm	10.2	26.0
(%) CV	8.0	4.4

6.1.2 EFECTOS DE SEGUNDO GRADO

6.1.2.1. Interacciones Nitrógeno por Fósforo, Potasio y Estiércol (N-P,N-K, N-MO)

Suelo arenoso

En el cuadro 3 se observa que todos los tratamientos donde el fertilizante nitrogenado fue sulfato de amonio, es decir el fertilizante que contiene azufre, superaron a los tratamientos donde la fuente nitrogenada fue urea. También se observa que las asociaciones del sulfato de amonio o urea con sulfato de potasio y sulfato de amonio o urea con materia orgánica dieron los mayores valores de peso seco debido al aporte de sulfatos por los abonos mencionados (ver gráficos 5, 6 y 7).

Lo anterior nos estaría indicando que el cultivo de cebolla roja arequipeña necesita más sulfatos de los que puede aportar naturalmente el suelo, las cuales lo requieren en cantidades semejantes al fósforo (2/3), en el caso de la cebolla requiere 1.1 Kg de azufre por tonelada de rendimiento comercial; esta necesidad puede cubrirse vía el uso de fertilizantes que lo contengan. El uso de materia orgánica, en este caso estiércol de vacuno, también cubre la necesidad de azufre por el cultivo debido al aporte de sulfatos y por las mejoras físicas, químicas y biológicas que implican su uso.

En cuanto a la fuente fosforada no se observó respuesta al usar el fertilizante que contenía azufre (superfos-24) pero ello se debe a que este fertilizante tiene una lenta solubilidad y por lo tanto la limitante en el normal desarrollo del cultivo fue la deficiencia de fósforo disponible comparado con el superfosfato triple de calcio.

Suelo franco

En este caso los tratamientos donde el fertilizante nitrógenado fue la urea, sin azufre, obtuvieron los mayores pesos secos probablemente debido a que el aporte de azufre dado por el suelo fue suficiente para el desarrollo del cultivo (> 60 ppm) y por tanto no fue necesario el uso de una fuente indirecta de azufre como el sulfato de amonio. Lo mismo se observó en las fuentes de potasio y estiércol donde en el peso seco de bulbos y total no hubo diferencias significativas al utilizar el cloruro de potasio o el sulfato de potasio; la aplicación de estiércol para este caso no tuvo efecto debido en parte al corto periodo vegetativo del cultivo y a las buenas características del suelo (ver cuadro 5, gráficos 5, 6 y 7).

6.1.2.2. Interacciones Fósforo por potasio y Estiércol (P-K, P-MO) y Potasio por Estiércol (K-MO)

Como se observa en los cuadros 4 y 6 y en los gráficos 8, 9 y 10, las interacciones P-K, P-MO y K-MO muestran resultados similares en ambos sustratos en donde se observó que los tratamientos con el superfosfato triple de calcio (ST) superaron a los tratamientos con superfos-24 debido a la mayor solubilidad del ST. Los mayores pesos secos de bulbos y totales se obtuvieron al fertilizar con ST-SK por el aporte de sulfatos del SK. En arena no hubo diferencia significativa entre las interacciones.

En ambos sustratos, la interacción SF24-0MO tuvo los valores más bajos y fue la interacción que ocasionó que existan diferencias significativas. Se observó que al combinar SF24 con 0.5% de MO hay un incremento significativo debido a que los ácidos de la materia orgánica ayudan a disolver el fertilizante incrementando el fósforo disponible para el cultivo.

En el sustrato arenoso, en el peso seco total no hubo diferencia entre las interacciones, en bulbos la mejor respuesta se dio entre SF24-0.5%MO y ST-0.5%MO. En el suelo franco, el

mayor peso seco de bulbos y total se dio con superfosfato triple de calcio con y sin materia orgánica.

Los abonos orgánicos tienen importancia por su aportación de humus; una clasificación muy simple de las sustancias húmicas divide a estas en humus nutritivo y humus estable. El humus nutritivo es descompuesto más o menos rápidamente por los organismos del suelo, a los que suministra sustancias nutritivas y energía. El humus estable se mantiene en el suelo durante más tiempo, mejorando la fertilidad de este. La múltiple acción de los abonos orgánicos sobre los cultivos se produce en parte directamente, y en parte indirectamente sobre las propiedades físicas y químicas del suelo (Finck, 1985).

Cuadro 3. Efectos de segundo grado de los ensayos factoriales de N-P, N-K y N-MO en un suelo arenoso en el cultivo de cebolla roja arequipeña bajo condiciones de invernadero.

SUELO	ENTISOL	
INTERACCION DE DOS FACTORES		
	Rdto (g/mac)	
1. N X P.	Bulbo	Total
Urea-ST	4.2	12.3
Urea-SF-24	3.5	11.0
SA-ST	5.1	13.7
SA-SF-24	4.7	13.9
DLS	*	*
0.05 (g/mac)	0.4	0.9
2. N x K		
Urea-CIK	3.7	10.6
Urea-SK	4.0	12.6
SA-CIK	5.0	13.0
SA-SK	4.8	14.6
DLS	*	*
0.05 (g/mac)	0.4	0.9
3. N X MO		
Urea-0MO	3.4	10.1
Urea-0.5%MO	4.3	13.1
SA-0MO	4.4	13.1
SA-0.5%MO	5.4	14.5
DLS	*	*
0.05 (g/mac)	0.4	0.9
CV(%)	9.7	8.2

Cuadro 4. Efectos de segundo grado de los ensayos factoriales de P-K, P-MO y K-MO en un suelo arenoso en el cultivo de cebolla roja arequipeña bajo condiciones de invernadero.

SUELO	ENTISOL	
INTERACCION DE DOS FACTORES		
	Rdto (g/mac)	
4.P X K	Bulbo	Total
ST -CIK	4.5	12.4
ST -SK	4.8	13.5
SF24-CIK	4.1	11.3
SF24-SK	4.0	13.6
DLS	*	*
0.05 (g/mac)	0.4	0.9
5.P x MO		
ST -0MO	4.5	12.1
ST -0.5%MO	4.8	13.9
SF24-0MO	3.3	11.2
SF24-0.5%MO	4.9	13.7
DLS	*	*
0.05 (g/mac)	0.4	0.9
6. K X MO		
CIK-0MO	3.8	10.6
CIK-0.5%MO	4.9	13.1
SK-0MO	4.0	12.7
SK-0.5%MO	4.8	14.5
DLS	*	*
0.05 (g/mac)	0.4	0.9
CV(%)	9.7	8.2

Cuadro 5. Efectos de segundo grado de los ensayos factoriales de N-P, N-K y N-MO en un suelo franco en el cultivo de cebolla roja arequipeña bajo condiciones de invernadero.

SUELO	INCEPTISOL	
INTERACCION DE DOS FACTORES		
	Rdto (g/mac)	
1. N X P.	Bulbo	Total
Urea-ST	13.8	31.1
Urea-SF-24	9.0	25.5
SA-ST	11.4	28.1
SA-SF-24	9.5	23.6
DLS	*	*
0.05 (g/mac)	0.7	1.0
2. N x K	11.2	29.0
Urea-CIK	11.5	27.6
Urea-SK	9.7	23.9
SA-CIK	11.2	27.8
SA-SK		
DLS	*	*
0.05 (g/mac)	0.7	1.0
3. N X MO		
Urea-0MO	12.2	30.0
Urea-0.5%MO	10.4	26.6
SA-0MO	10.0	24.6
SA-0.5%MO	10.9	27.1
DLS	*	*
0.05 (g/mac)	0.7	1.0
CV(%)	8.0	4.4

Cuadro 6. Efectos de segundo grado de los ensayos factoriales de P-K, P-MO y K-MO en un suelo franco en el cultivo de cebolla roja arequipeña bajo condiciones de invernadero.

SUELO	INCEPTISOL	
INTERACCION DE DOS FACTORES		
	Rdto (g/mac)	
4.P X K	Bulbo	Total
ST -CIK	11.3	26.9
ST -SK	13.8	32.3
SF24-CIK	9.6	26.0
SF24-SK	8.8	23.1
DLS	*	*
0.05 (g/mac)	0.7	1.0
5.P x MO		
ST -0MO	13.4	30.9
ST -0.5%MO	11.8	28.3
SF24-0MO	8.9	23.7
SF24-0.5%MO	9.6	25.4
DLS	*	*
0.05 (g/mac)	0.7	1.0
6. K X MO		
CIK-0MO	9.8	25.6
CIK-0.5%MO	11.1	27.3
SK-0MO	12.5	29.0
SK-0.5%MO	10.2	26.4
DLS	*	*
0.05 (g/mac)	0.7	1.0
CV(%)	8.0	4.4

6.1.3 EFECTOS DE TERCER GRADO

6.1.3.1 Interacción Nitrógeno, Fósforo, Potasio (N-P-K)

Suelo arenoso

En el cuadro 7 y gráfico 11 se observa que el tratamiento SA-SF24-SK tuvo el mayor peso seco total, es decir al utilizar aquellos fertilizantes que aportan azufre, ello debido a la necesidad del cultivo de cebolla considerado como un cultivo extractivo. Los mayores pesos secos de bulbos se obtuvieron con los tratamientos SA-ST-CIK y SA-ST-SK en donde se observa que existen fuentes indirecta de azufre a través de los fertilizantes excepto en el caso del fertilizante fosforado por las características ya mencionadas.

Suelo franco

Los mayores pesos secos de bulbo y total se obtuvieron con los tratamientos U-ST-SK y SA-ST-SK donde se observa la presencia de por lo menos una fuente de azufre (sulfato de potasio y/o sulfato de amonio) (ver cuadro 9 y gráfico 11).

6.1.3.2 Interacciones N-P-MO, N-K-MO y P-K-MO

Suelo arenoso

En todas las interacciones la incorporación del estiércol ha incrementado el peso seco total y de bulbos que si no se suministrara. Para el caso de la interacción N-P-MO el mayor peso seco de bulbos y total se obtuvo al usar SA-SF24-0.5%MO debido al aporte de azufre y a que la materia orgánica permitió una mayor solubilidad del superfos-24; el último lugar lo ocupa el tratamiento U-

SF24-0MO donde no hay aporte de azufre salvo el SF24 pero por su baja solubilidad causa un desequilibrio al no cubrir la demanda de fósforo por el cultivo (ver cuadro 7, gráfico 12).

En la interacción N-K-MO los mayores pesos secos totales y de bulbos se obtuvieron con los tratamientos SA-SK-0.5%MO, SA-SK-0MO y SA-ClK-0.5%MO; es decir aquellos tratamientos donde alguna fuente de fertilizante aportaba azufre, el mayor peso seco se obtuvo cuando todas las fuentes aportaban azufre lo cual nos indica que para este caso el azufre no se encuentra en cantidad suficiente para el cultivo de cebolla (ver cuadro 8, gráfico 13).

Algo similar se observó en la interacción P-K-MO donde los mejores tratamientos fueron ST-SK-0.5%MO y SF24-SK-0.5%MO (ver cuadro 8, gráfico 14).

Suelo franco

No se encontró incrementos en el peso seco al utilizar estiércol probablemente por el corto periodo vegetativo del cultivo y por las características del suelo. A diferencia del substrato anterior, los mayores pesos secos se obtuvieron al usar urea, superfosfato triple de calcio y sulfato de potasio o cloruro de potasio debido a que el suelo está provisto de azufre (ver cuadros 9 y 10, gráficos 12, 13 y 14).

Cuadro 7. Efectos de tercer grado de los ensayos factoriales de N-P-K y N-P-MO en un suelo arenoso en el cultivo de cebolla roja arequipeña bajo condiciones de invernadero.

SUELO	ENTISOL	
INTERACCION DE TRES	Rdto (g/mac)	
FACTORES	Bulbo	Total
1) N X P X K		
U - ST - CIK	3,8	11,1
U - ST - SK	4,7	13,5
U - SF24-CIK	3,6	10,2
U - SF24-SK	3,4	11,6
SA - ST - CIK	5,2	13,8
SA - ST - SK	4,9	13,6
SA - SF24-CIK	4,7	12,3
SA - SF24-SK	4,6	15,7
DLS(t/ha)	*	*
0.05	1.2	1.2
2) N X P X MO		
U - ST - 0MO	3.8	10.7
U - ST - 0.5%MO	4.7	13.9
U - SF24- 0MO	3.1	9.6
U - SF24- 0.5%MO	3.9	12.3
SA - ST - 0MO	5.2	13.4
SA - ST - 0.5%MO	4.9	13.9
SA - SF24-0MO	3.5	12.8
SA - SF24-0.5%MO	5.8	15.2
DLS(t/ha)	*	*
0.05	1.2	1.2
(%) CV	9,68	8,23

Cuadro 8. Efectos de tercer grado de los ensayos factoriales de N-K-MO y P-K-MO en un suelo arenoso en el cultivo de cebolla roja arequipeña bajo condiciones de invernadero.

SUELO	ENTISOL	
INTERACCION DE TRES	Rdto (g/mac)	
FACTORES	Bulbo	Total
3) N X K X MO		
U - CIK - 0MO	3.4	9.5
U - CIK - 0.5%MO	4.0	11.8
U - SK - 0MO	3.5	10.8
U - SK - 0.5%MO	4.6	14.4
SA - CIK - 0MO	4.2	11.6
SA - CIK - 0.5%MO	5.8	14.4
SA - SK - 0MO	4.6	14.5
SA - SK - 0.5%MO	5.0	14.7
DLS(t/ha)	*	*
0.05	1.2	1.2
4) P X K X MO		
ST - CIK - 0MO	4.3	11.7
ST - CIK - 0.5%MO	4.7	13.2
ST - SK - 0MO	4.7	12.5
ST - SK - 0.5%MO	5.0	14.6
SF24 - CIK - 0MO	3.3	9.5
SF24 - CIK - 0.5%MO	5.1	13.0
SF24 - SK - 0MO	3.4	12.9
SF24 - SK - 0.5%MO	4.7	14.4
DLS(t/ha)	*	*
0.05	1.2	1.2
(%) CV	9,68	8,23

Cuadro9. Efectos de tercer grado de los ensayos factoriales de N-P-K y N-P-MO en un suelo franco en el cultivo de cebolla roja arequipeña bajo condiciones de invernadero.

SUELO	INCEPTISOL	
INTERACCION DE TRES	Rdto (g/mac)	
FACTORES	Bulbo	Total
1) N X P X K		
U - ST - CIK	12.5	29.1
U - ST - SK	15.0	33.1
U - SF24-CIK	9.9	29.0
U - SF24-SK	7.9	22.0
SA - ST - CIK	10.1	24.7
SA - ST - SK	12.7	31.5
SA - SF24-CIK	9.2	23.1
SA - SF24-SK	9.7	24.1
DLS(t/ha)	*	*
0.05	1.0	1.4
2) N X P X MO		
U - ST - 0MO	15.3	33.8
U - ST - 0.5%MO	12.2	28.4
U - SF24- 0MO	9.2	26.2
U - SF24- 0.5%MO	8.7	24.8
SA - ST - 0MO	11.5	28.1
SA - ST - 0.5%MO	11.3	28.1
SA - SF24-0MO	8.6	21.1
SA - SF24-0.5%MO	10.4	26.0
DLS(t/ha)	*	*
0.05	1.0	1.4
(%) CV	8	4.4

Cuadro 10. Efectos de tercer grado de los ensayos factoriales de N-K-MO Y P-K-MO en un suelo franco en el cultivo de cebolla roja arequipeña bajo condiciones de invernadero.

SUELO	INCEPTISOL	
INTERACCION DE TRES	Rdto (g/mac)	
FACTORES	Bulbo	Total
3) N X K X MO		
U - CIK - 0MO	11.3	29.7
U - CIK - 0.5%MO	11.1	28.4
U - SK - 0MO	13.1	30.3
U - SK - 0.5%MO	9.8	24.8
SA - CIK - 0MO	8.3	21.6
SA - CIK - 0.5%MO	11.1	26.2
SA - SK - 0MO	11.8	27.6
SA - SK - 0.5%MO	10.6	28.0
DLS(t/ha)	*	*
0.05	1.0	1.4
4) P X K X MO		
ST - CIK - 0MO	11.7	28.6
ST - CIK - 0.5%MO	10.9	25.2
ST - SK - 0MO	15.0	33.2
ST - SK - 0.5%MO	12.6	31.3
SF24 - CIK - 0MO	7.9	22.7
SF24 - CIK - 0.5%MO	11.3	29.4
SF24 - SK - 0MO	9.9	24.7
SF24 - SK - 0.5%MO	7.8	21.4
DLS(t/ha)	*	*
0.05	1.0	1.4
(%) CV	8	4.4

6.1.4 EFECTO DE CUARTO GRADO

6.1.4.1. Interacción N-P-K-MO

Suelo arenoso

En el cuadro 11 y gráfico15 se muestran los pesos secos totales de los 16 tratamientos considerados en el factorial.

Se encontró que aquellos tratamientos con sulfato de amonio superaron a los tratamientos con urea debido al aporte de sulfatos. En los tratamientos con urea, los mayores valores de peso seco total se dieron primero con U-ST-SK-0.5%MO y segundo con U-SF24-SK-0.5%MO el primero por la solubilidad del superfosfato triple de calcio y el segundo por el efecto positivo que se da al mezclar el SF24 y la materia orgánica.

En el sulfato de amonio los mayores valores de peso seco se obtuvieron con los cuatro tratamientos que contenían superfosfato triple de calcio y con tres de superfos24 cuando se abono con estiércol; de estos destacaron los tratamientos SA-SF24-SK con y sin MO y SA-SF24-CIK-OMO; también se observó un mayor peso seco al usar sulfato de potasio en lugar de cloruro de potasio.

Los valores más bajos de peso seco se dieron con los tratamientos sin materia orgánica y con aquellos fertilizantes más concentrados sin azufre en su composición y a tratamientos con SF-24.

Los mayores pesos secos se obtuvieron al usar 2 a 3 fuentes indirectas de azufre vía aplicación indirecta de fertilizantes o estiércol y los menores pesos secos cuando se utilizo 1 o ninguna fuente de azufre.

En general, se observa que existe una respuesta significativa ante la aplicación de fertilizantes que contienen azufre en el siguiente orden SA > SK > SF24. Además, observamos que el SF24 a pesar de su baja solubilidad cuando interactúa con materia orgánica tuvo una buena respuesta.

Suelo franco

En el cuadro 12 y gráfico 16 se muestran los pesos secos totales de los 16 tratamientos considerados en el factorial.

Los tratamientos con urea superaron a aquellos con sulfato de amonio probablemente por la riqueza del suelo en sulfatos (62 ppm) y al aporte de sulfatos por el agua de riego (170 ppm). En los tratamientos con urea los mejores corresponden a aquellos que tenían ST y SF24-0.5%MO. En este caso fue indistinto usar CIK o SK debido a que el suelo es rico en este elemento (830 Kg/ha) y al aporte de potasio por el agua de riego (0.3g). En sulfato de amonio se obtuvo el mayor peso seco en los tratamientos que tenían superfosfato triple de calcio y sulfato de potasio, es decir las interacciones SA-ST y SA-SK incrementaron en peso seco.

En general se observa que los fertilizantes más concentrados y libres de azufre (urea, superfosfato triple de calcio) superaron al sulfato de amonio, superfos24 probablemente por la mayor solubilidad y porque el suelo estaba bien provisto de sulfatos. En la fertilización potásica no se observó mayor respuesta al aplicar cloruro de potasio o sulfato de potasio aunque el peso seco se dio al usar SK probablemente porque este fertilizante aportó una pequeña cantidad de sulfatos sin llegar al exceso que fueron usadas por el cultivo, hubo una interacción positiva entre SA-SK y ST-SK.

Cuadro 11. Efectos de cuarto grado de los ensayos factoriales de N-P-K-MO en un suelo arenoso en el cultivo de cebolla roja arequipeña.

SUELO	ENTISOL	
	Rdto (g/mac)	
INTERACCION DE CUATRO FACTORES	Bulbo	Total
N X P X K X MO		
U - ST - CIK - 0MO	3.4	9.7
U - ST - CIK - 0.5%MO	4.2	12.4
U - ST - SK - 0MO	4.1	11.7
U - ST - SK - 0.5%MO	5.3	15.3
U - SF24 - CIK - 0MO	3.4	9.3
U - SF24 - CIK - 0.5%MO	3.8	11.1
U - SF24 - SK - 0MO	2.8	9.8
U - SF24 - SK - 0.5%MO	4.0	13.4
SA - ST - CIK - 0MO	5.2	13.6
SA - ST - CIK - 0.5%MO	5.3	13.9
SA - ST - SK - 0MO	5.2	13.2
SA - ST - SK - 0.5%MO	4.6	13.9
SA - SF24 - CIK - 0MO	3.1	9.7
SA - SF24 - CIK - 0.5%MO	6.4	14.9
SA - SF24 - SK - 0MO	3.9	15.9
SA - SF24 - SK - 0.5%MO	5.3	15.4
DLS(t/ha)	*	*
0.05	0.7	1.7
%cv	9.7	8.2

Cuadro 12. Efectos de cuarto grado de los ensayos factoriales de N-P-K-MO en un suelo franco en el cultivo de cebolla roja arequipeña.

SUELO	INCEPTISOL	
	Rdto (g/mac)	
INTERACCION DE CUATRO FACTORES	Bulbo	Total
N X P X K X MO		
U - ST - CIK - 0MO	14.4	33.6
U - ST - CIK - 0.5%MO	10.7	24.6
U - ST - SK - 0MO	16.2	34.0
U - ST - SK - 0.5%MO	13.8	32.2
U - SF24 - CIK - 0MO	8.3	25.7
U - SF24 - CIK - 0.5%MO	11.6	32.2
U - SF24 - SK - 0MO	10.0	26.7
U - SF24 - SK - 0.5%MO	5.8	17.4
SA - ST - CIK - 0MO	9.1	23.6
SA - ST - CIK - 0.5%MO	11.1	25.8
SA - ST - SK - 0MO	13.9	32.5
SA - ST - SK - 0.5%MO	11.5	30.4
SA - SF24 - CIK - 0MO	7.5	19.6
SA - SF24 - CIK - 0.5%MO	11.1	26.6
SA - SF24 - SK - 0MO	9.7	22.7
SA - SF24 - SK - 0.5%MO	9.5	25.5
DLS(t/ha)	*	*
0.05	1.4	2.0
%cv	8.0	4.4

6.1.5 Efecto de la aplicación de fertilizantes con azufre y de la flor de azufre en la acumulación de este nutriente en los bulbos.

En general, los nutrientes presentes en los cultivos son un reflejo de los mismos en el suelo principalmente en forma disponible, por ello observamos que la cebolla que creció en sustrato arena presentó un menor porcentaje de azufre.

Asimismo, como se observa en el anexo 5, en ambos sustratos, aquellos tratamientos con alguna fuente de azufre superaron al testigo (en este caso tratamiento 1: U-ST-CIK-0MO; es decir aquel tratamiento donde se utilizaron fertilizantes más concentrados y sin aplicación de estiércol), excepto cuando se utilizó el SF-24 probablemente debido a que el fósforo fue un elemento limitante que no permitió una normal acumulación del azufre en los tejidos. En el tratamiento con flor de azufre se observa que la acumulación de este nutriente en el bulbo fue semejante al testigo probablemente porque hubo una lenta oxidación del elemento.

6.2 RESULTADOS CAMPO

6.2.1 EFECTOS PRINCIPALES

En el cuadro 13 se muestran los rendimientos en los efectos de primer grado en los cultivos de cebolla y papa.

6.2.1.1 Efecto primario del Nitrógeno

Según los resultados de rendimiento dados en $t\ ha^{-1}$, los tratamientos con sulfato de amonio superaron a aquellos tratamientos con urea por el aporte de sulfatos obteniéndose rendimientos de 63.2 y 60.6 t respectivamente en el cultivo de cebolla y con rendimientos de 32.3 y 31.9 t respectivamente en el cultivo de papa, además se observó una mejor apariencia en aquellos tratamientos con sulfato de amonio probablemente por la mayor resistencia que presentan al ataque de enfermedades fungosas.

Se observó una gran diferencia de los dos fertilizantes comparados con los testigos absoluto y sin nitrógeno en ambos cultivos. El análisis de suelo reportó como se esperaba un bajo contenido de materia orgánica y por tanto una baja tasa de nitrógeno mineral dado por el suelo a través de la mineralización lo cual no satisface los requerimientos de nitrógeno para los cultivos.

6.2.1.2 Efecto primario del Fósforo

En el cultivo de papa, el superfosfato triple de calcio (ST) superó al superfos-24 (SF-24) en más de 2 t de rendimiento. El ST, en cuanto a sus propiedades químicas, posee del 42-50% de P_2O_5 total, un 40-49% de P_2O_5 que se halla en forma asimilable como ortofosfato monocálcico, soluble en agua; el SF-24 poseen un 24% de P_2O_5 total del cual, sólo el 10-12% es soluble en agua (Villagarcía, 1994). La diferencia en cuanto a la cantidad de fósforo aportado en función a la

concentración de P_2O_5 soluble en agua, la solubilidad de los fertilizantes, la velocidad de disolución y sus características de reacción en el suelo han determinado la superioridad del ST.

En el cultivo de cebolla el SF-24 superó al ST en 7 t, es decir, el SF-24 aún con sus limitaciones ha tenido una buena respuesta atribuida, probablemente, a las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo y a que el campo fue abonado con 10 t estiércol a diferencia del cultivo de papa. La solubilidad del fósforo de diferentes rocas fosfatadas aumenta en forma exponencial al disminuir el pH, además, la velocidad de disolución está en función del tamaño del gránulo (grado de molienda) o de la superficie de las partículas, del grado de calcinación y del pH. Estas características indican que en suelos ácidos o con recientes enmiendas orgánicas se puede esperar un buen efecto de las rocas fosfatadas finamente molidas y aplicadas como fertilizantes (Fassbender, 1987).

El azufre presente en el SF-24 determina una acción sinérgica con otros nutrientes, particularmente con el nitrógeno, siendo esta relación la más importante al estar ambos nutrientes involucrados en la síntesis de proteínas (Bornemisza, 1990).

En ambos cultivos se tuvieron respuestas significativas ante la aplicación de fósforo comparados con el testigo absoluto y el testigo sin fósforo.

6.2.1.3 Efecto principal del Potasio

Según los resultados de rendimiento dados en $t\ ha^{-1}$, los tratamientos con sulfato de potasio superaron a aquellos tratamientos con cloruro de potasio con rendimientos de 64.0 y 60.0 t respectivamente en el cultivo de cebolla y con rendimientos de 33.2 y 31.1 t respectivamente en el cultivo de papa, debido al aporte de azufre por parte del sulfato de potasio. El cultivo de cebolla para producir 1 t de cosecha comercial extrae 1,1 kg de azufre (Bornemisza, 1990), mientras que

para producir 1 t de tubérculo fresco (cosecha comercial) el cultivo extra 0.8 kg de azufre (Villagarcía, 1994).

En ambos suelos el contenido de potasio fue interpretado como un nivel alto (más de 1 000 Kg K_2O/ha) lo cual es común en suelos de sierra al estar dotados de potasio por la naturaleza de la roca madre o material parental, la presencia de minerales primarios como los filosilicatos: biotita y muscovita e inosilicatos: feldespatos y minerales arcillosos: illita, vermicullita y glauconita; la movilización del potasio de estas formas a los suelos, está en función a la meteorización, mineralización y desorción (Fassbender y Bornemisza, 1987). Esto fue corroborado en las parcelas testigos sin potasio al obtenerse rendimientos de 26 t en papa y 51 t en cebolla; sin embargo, hubo alta respuesta ante la aplicación de fertilizantes potásicos tanto en rendimiento como en calidad.

Cuadro 13. Efectos de primer grado de fertilizantes que aportan/no aportan azufre en el rendimiento total de cebolla y papa durante la campaña 97.

EFFECTOS PRIMER GRADO	Rdto (t/ha)	
	Cebolla	Papa
1. NITROGENO		
Testigo 0-0-0	37.3	16.7
Testigo 0-P-K	43.2	19.3
Urea	60.6	31.9
Sulfato de Amonio	63.2	32.3
2. FOSFORO		
Testigo 0-0-0	37.3	16.7
Testigo N-0-K	45.5	23.7
S.T	58.4	33.3
SF-24	65.3	31.0
3. POTASIO		
Testigo 0-0-0	37.3	16.7
Testigo N-P-0	51.3	26.3
CIK	59.7	31.1
S.K	64.0	33.2
(%) CV	16.9	12.5

6.2.2 EFECTOS DE SEGUNDO GRADO

Interacciones N-P, N-K y P-K

Las interacciones siguen lo observado en los efectos primarios, es decir, en el caso de la cebolla y papa aquellos tratamientos con sulfato de amonio (SA) superaron a los que tenían urea, los tratamientos con sulfato de potasio superaron a los asociados con cloruro de potasio. En el caso de la fertilización fosforada, la cebolla presentó mejor respuesta con el SF-24 mientras que la papa tuvo mejor rendimiento con el ST por lo explicado anteriormente. En ningún caso hubo diferencias significativas entre los tratamientos (ver cuadro 14).

6.2.3 EFECTOS DE TERCER GRADO

Interacción N-P-K.

En el caso de la cebolla aquellos tratamientos que tenían dos o las tres fuentes de fertilizantes concentrados presentaron los menores rendimientos (menos de 60 t) mientras que los tratamientos donde se fertilizó con dos fuentes de azufre en forma indirecta se obtuvieron los mayores rendimientos (más de 60 t) siendo el tratamiento SA-SF-24-SK el que dió el mayor rendimiento con más de 69 t.

En el caso de la papa aquellos tratamientos donde se abono con fertilizantes concentrados (urea, ST y ClK) y con SF-24 (baja solubilidad) tuvieron los menores rendimientos mientras que los tratamientos donde se utilizó SA y/o SK dieron los mayores rendimientos probablemente por el aporte de sulfatos por estos fertilizantes (ver cuadro 15).

Cuadro 14. Efectos de segundo grado de fertilizantes que aportan/no aporta azufre en el rendimiento promedio de los cultivos de cebolla y papa, durante la campaña de 1997.

INTERACCION DE DOS FACTORES		
	Rdto (t/ha)	
	Cebolla	Papa
1.N X P.		
Urea-ST	57.0	33.7
Urea-SF-24	64.2	30.2
SA-ST	59.8	32.8
SA-SF-24	66.5	31.8
2. N x K		
Urea-CIK	58.5	30.5
Urea-SK	62.7	33.3
SA-CIK	61.0	31.7
SA-SK	65.3	33.0
3.P X K		
ST -CIK	57.9	32.2
ST -SK	58.9	34.3
SF24-CIK	61.5	30.0
SF24-SK	69.1	32.0
DLS	n.s	n.s
0.05 (g/mac)	12.9	4.9
CV(%)	16.9	12.5

Cuadro 15. Efectos de tercer grado de fertilizantes que aportan/no aportan azufre en el rendimiento de los cultivos de cebolla y papa durante la campaña de 1997.

INTERACCION DE TRES FACTORES N X P X K	Rdto (t/ha)	
	Cebolla	Papa
U - ST - CIK	57.5	31.7
U - ST - SK	56.6	35.7
U - SF24-CIK	59.5	29.3
U - SF24-SK	68.8	31.0
SA - ST - CIK	58.3	32.7
SA - ST - SK	61.3	33.0
SA - SF24-CIK	63.6	30.7
SA - SF24-SK	69.4	33.0
DLS(t/ha)	n.s	n.s
0.05	18.3	7.0
(%) CV	16.9	12.5000

VII. CONCLUSIONES

7.1 CONCLUSIONES EXPERIMENTOS INVERNADERO

1. Los suelos arenosos son los que presentan mayores deficiencias de azufre por su bajo contenido de materia orgánica y por sus características inherentes a la clase textural.
2. En los suelos arenosos los incrementos de rendimiento son altamente significativos al usar fertilizantes con azufre.
3. Los suelos francos en función al grado de explotación del mismo, responden en mayor o menor magnitud ante la aplicación de fertilizantes que contengan azufre.
4. En los suelos francos los incrementos del rendimiento no son tan marcados como en los suelos arenoso ante la aplicación de azufre debido a que tienen un contenido de medio a alto de azufre en el suelo.
5. En el caso de los fertilizantes fosforados, el superfos 24 no supero al superfosfato triple de calcio a pesar de tener azufre en su composición debido a su menor solubilidad creando un ambiente de deficiencia del elemento fósforo para el cultivo.
6. Se observó que en los tratamientos con SF24 y estiércol la solubilidad del fertilizante se incrementaba logrando competir con el ST.
7. Los resultados de los ensayos de invernadero reflejan los resultados obtenidos en campos experimentales.

7.2 CONCLUSIONES EXPERIMENTOS DE CAMPO

1. En el rendimiento de papa y cebolla no hubo diferencias significativas en usar fertilizantes concentrados a aquellos que contiene azufre lo cual demuestra que estos suelos asociados a los cultivos mencionados, clima y manejo, están bien provistos del elemento azufre.
2. En los suelos francos, a pesar de que existan diferencias estadísticamente no significativas entre el uso de fertilizantes con azufre, el uso de estos fertilizantes compensan los costos e incluso generan ganancias por incrementar el rendimiento y mejorar la calidad de los cultivos.
3. Se observó la tendencia hacia un mejor rendimiento y calidad de los cultivos al usar fertilizantes con azufre probablemente por la mayor formación de proteínas les permite resistir mejor el ataque de enfermedades fungosas.
4. En cebolla los mayores rendimientos en función del uso de fertilizantes que contienen azufre se lograron con SF-24 con estiércol > SK > SA
5. En papa los mayores rendimientos en función del uso de fertilizantes que contienen azufre se lograron con SK > SA > SF-24 sin estiércol

VIII. RECOMENDACIONES

1. En áreas donde existan cultivos continuos debe suministrarse azufre como componente de fertilización.
2. La adición de unos 30 Kg S ha⁻¹ en áreas donde se reconocen deficiencias de azufre en el suelo, satisfacen los requerimientos nutricionales de los cultivos y podrían aportarse como SK y/o SA. En suelos ácidos y/o con aplicaciones de enmiendas orgánicas puede aportarse S como SF-24.
3. Si el suelo reporta menos de 8 ppm de sulfatos entonces, probablemente en el suelo habrán respuestas a la adición de azufre dependiendo del cultivo, ambiente y manejo pues el contenido en el suelo es interpretado como bajo.
4. Realizar una formulación de NPKS adecuada y en lo posible acompañada de una buena aportación de estiércol al haberse demostrado mejores rendimientos en cuanto a la eficiencia de la fertilización y el aporte de nutrientes para las plantas.
5. Realizar más investigaciones relacionadas al aporte de azufre en los diversos cultivos, en diferentes localidades y durante varias campañas consecutivas. Se propone, investigar dosis de azufre usando azufre elemental o yeso agrícola para determinar el óptimo requerido por el cultivo.

Recomendaciones de aplicación de azufre en función de la textura, estiércol y cultivo

	Arenoso		Franco	
%arcilla	< 10		> 10	
%MO	< 0.8		> 0.8	
Cultivos	Sin estiércol	Con estiércol	Sin estiércol	Con estiércol
	Kg de S ha ⁻¹			
Exigentes Crucíferas, leguminosas, liliáceas.	40 - 60	30 - 50	20 - 40	0 - 20
Med. Exigentes Solaneceas	30 - 50	20 - 40	0 - 20	0 - 10
Poco exigentes Cereales	20 - 40	0-20	0 - 20	0 - 10

Posibles fuentes:

SULPOMAG	22% S
S.A	24 %S
S.K	18%S
SF-24	7%S
ESTIERCOL	1 t : 5 - 8 Kg S

IX. BIBLIOGRAFIA

1. **AGRICULTURA DE LAS AMERICAS. (1988).** Azufre: el cuarto elemento principal.
2. **AULAKH, M. (1977).** Effect of Sulphur Fertilization on the Yield and Quality of Potatoes (Solanum tuberosum L.). Department of Soils, Punjab Agricultural University, Ludhiana, Punjab. In J. indian Soc. Soil Sci. Vol 25(2): 182-185
3. **BEATON, J.D. (1966).** Sulfur requirements of cereals, tree fruits, vegetables and other crops. Soil Science 101: 267-282.
4. **BLAIR, G.J. (1979).** Sulfur in the tropics. IFDC Technical Bulletin. T-12, 69 pp.
5. **BIXBY, D. and RUCKER, D. (1965).** Plant Nutrient Sulphur. Technical Bulletin Number 11. The Sulphur Institute, Washington, D.C. USA. pp 1-4.
6. **BORNEMISZA, E. (1990).** Problemas del azufre en los suelos y cultivos de mesoamérica. Ed. Univ. Costa Rica. Editorial de la Universidad de Costa Rica. 104 pp.
7. **BORNEMISZA, E. (1959).** Categorías de azufre en la meseta central, San José, Costa Rica. Ministerio de Agricultura e Industrias. Informe 7 pp.
8. **BROMFIELD, A.R. (1973).** J. Agri. Sci and Expl. Agric., 9, 55.

9. **BURBANO, H. y BLASCO, M. (1975).** Suelos volcánicos de Nicaragua. II Contenidos y distribución de azufre. Turrialba 25 (4): 429-435.

10. **CARRILLO, C. (1989).** Curvas de extracción de macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg) en cebolla (Allium cepa L) 'Texas Early Grano 502'. Tesis UNALM.

11. **CHAO, T.T; HARDWARD, M.E.; FANG, S.C. (1962).** Movement of ³⁵S tagged sulfate through soil columns. Soil Science Soc.Am.Proc. 26(1): 27-32.

12. **COLEMAN, R. (1966).** The importance of sulphur as a plant nutrient in world crop production. Soil Science 101: 230-239.

13. **DEPESTRE, T. (1992).** Producción, postcosecha, procesamiento y comercialización de ajo, cebolla y tomate. F.A.O. Santiago de Chile.

14. **DEVLIN, R. (1970).** Fisiología Vegetal. Ediciones Omega SA. Barcelona, España.

15. **DOMINGUEZ, A. (1989).** Tratado de Fertilización. Ediciones Mundi Prensa. Madrid, España. 2da. edición.

16. **FASSBENDER, H. (1982).** Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Ed IICA. 398 pp.

17. **FASSBENDER, H y BORNEMISZA, E. (1987).** Química de suelos. Con énfasis en suelos de América Latina. Ed IICA San José, Costa Rica. 2da edición.

18. **FINCK, A. (1985).** Fertilizantes y fertilización. Fundamentos y métodos para la fertilización de los cultivos. Edit.Reverté S.A. Barcelona, España.

19. **FOX, R.L; ASGHAR, M.; CABLE, W.J. (1983).** Sulfate accretion in soils of te tropics. In Blair, G.J. and Till, A.R., Eds. Sulfur in S.E. Asian and S.Pacific Agriculture. Armidale, Australia. University of New England. Pp 39-53.

20. **FUENTES, Y. (1989).** Fertilizantes. Ed. Mundi Prensa. Barcelona.

21. **GOULDING, K.W., BROMFIELD, A.R. (1985).** Soil use management. 192 pp.

22. **GROS, A. (1981).** Abonos. Guía práctica de la fertilización. Ediciones Mundi Prensa. Madrid, España. 7ma Edición.

23. **GUERRERO, J. (1993).** Abonos Orgánicos. Tecnología para el manejo ecológico del suelo. Ed. RAAA. 90 pp.

24. **HAGSTROM, G.R. (1986).** Fertiluzer sources of sulfur and their uses. In: sulfur in agriculture, M.A.Tabatabai (ed). ASA Agronomy N° 27, Madison USA, 588 pp.

25. **INDUS (s/a).** Superfos-24; el abono fosfatado de gran poder residual. Fabricantes de abonos Compuestos Granulados y Superfosfatos.

26. **JONES, M.B., et al. (1968).** Soil Sci.Soc.Am.Proc., 32, 535.
27. **JONES, M.B. y RUCKMAN, J.E. (1966).** Agron. J., 58, 409.
28. **KAMPATH, E.J; TILL, A.R. (1983).** Sulfur cycling in the tropics. In Blair, G.J and Till, A.R., Eds Sulfur in S.E. Asian and S. Pacific Agriculture. Armidale, Australia, Univ. of New England. 324 pp.
29. **KANWAR, J.S Y MUDAHAR, M.S. (1986).** Fertilizer sulfur and food production. M. Nijhoff/Dr. w. Junk Publ.Dordrecht, Holland, 247pp.
30. **LI, P. y CALDWELL, A.C. (1966).** The oxidation of elemental sulfur in soil. Soil Science Society of America Proceeding. 30: 370-372.
31. **LOCKYER, D.R., et al. (1976).** J. exp. Bot., 27, 397.
32. **MALAVOLTA, E. (1976).** Manual de química agrícola. Nutrición de plantas y fertilidad del suelo. Editora Agronómica Ceres Ltda. Sao Paulo, Brasil.
33. **MARSCHNER, H. (1986).** Mineral nutrition of higher plants. Publisher International Potash Institute. 623 pp.
34. **MENGEL; KIRKBY. (1982).** Principles of plant nutrition. Publisher International Potash Institute. 623 pp.
35. **MESSING, J.H.L. (1969).** In the West Indies bananas respond to sulphur. Sulphur Inst. Jour. 5: 6-7.

36. **NAVARRO, A.A y PADDA, D.S. (1983).** Effects of sulfur, phosphorus and nitrogen application on the growth and yield of sweet potatoes grown on Fredensborg clay loam. *Journal of agriculture of the University of Puerto Rico.* 67: 108-111.
37. **NOR, Y.M. y TABATABAI, M.A. (1977).** Oxidation of elemental sulfur in soils. *Soil Science Society of America, Journal* 41: 736-741.
38. **OLSEN, R.A. (1957).** *Soil Science.* 84, 107.
39. **PATERSON, D. (1979).** Sulfur fertilization effects on onion yield and pungency. Progress report; Texas A.E.S (79) N3551.
40. **PEARSON, R.W.; ABRUÑA, F.; VICENTE-CHANDLER, J. (1962).** Effect of lime and nitrogen applications on downward movement of calcium and magnesium in two humid tropical soils of Puerto Rico. *Soil Science* 93: 77-82.
41. **PROBERT, M.E.; SAMOSIR, S.S (1983).** Sulfur in non-flooded tropical soils. In Blair, G.J. and Till, A.R., Eds, *Sulfur in S.E. Asian and S. Pacific Agriculture.* Armidale, Australia, Univ. of New England. 1983. pp. 15-27.
42. **QUEVEDO ITURRI, F. (S/A).** *Fertilidad del Suelo.* Ex-Profesor Principal del Departamento de Suelos y Fertilizantes de la UNALM. 224 pp.
43. **STARKEY, R.L. (1966).** Oxidation and reduction of sulfur compounds in soils. *Soil Science.* 101: 297-306.
44. **STEINHARDT, U; FASSBENDER, H.W. (1979).** Características y composición química de las lluvias de los Andes Occidentales de Venezuela. *Turrialba* 29: 175-182.

45. **SUD, K. et al. (1994).** Investigations on nitrogen and sulphur interaction in potato (Solanum tuberosum) on brown hill soils of Shimla. In Journal of the Indian Potato Association. 21(1/2):79.
46. **SULPHATE OF POTASH MAGNESIA EXPORT ASSOCIATION (s/a).** Fertilización del banano con SKMg. Houston, Texas 77060 USA.
47. **THE SULPHUR INSTITUTE. (s/a).** 1725 K Street. N.W. Washington D.C. 20006 U.S.A.
48. **TISDALE, S Y NELSON, W. (1977).** Fertilidad de los suelos y fertilizantes. Editorial Montaner y Simon S.A. Barcelona, España.
49. **TODD, S. (1994).** Cosecha, postcosecha y calificación de cebolla para exportación a los EEUU. Revista Agro Tecnología. Santiago de Chile.
50. **URBANO Y ROJO (1992).** Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Rusell. Ediciones Mundi-Prensa. 1045 pp.
51. **VILLAGARCIA; AGUIRRE. (1994).** Manual de uso de fertilizantes. UNALM, Departamento de Suelos y Fertilizantes. 142 pp.
52. **VILLAGARCIA, S y otros (1990).** Resultados de ensayos de campo sobre fertilización y nutrición mineral en el cultivo de papa (campaña 1989-1990). UNALM, Departamento de Suelos y Fertilizantes. Lima-Perú.
53. **VILLAGARCIA, S. (1987).** La nutrición mineral y la fertilización de la papa en "El cultivo de la papa con énfasis en producción de semilla" Programa de investigación y proyección social en pap. UNALM. Lima-Perú.

54. **VILLAGARCIA Y OTROS (1997)**. Fertilidad, manejo de suelos y nutrición mineral del azufre bajo diversas condiciones de clima, suelo, cultivos y nivel tecnológico de la agricultura andina. Cuadros resumen de los resultados experimentales de campo, invernadero y laboratorio durante la campaña 1996/1997. 152 pp.

55. **WESTERN Ag-MINERALS COMPANY (s/a)**. Las hortalizas necesitan algo más que N-P-K. K-Mag/ apuntes agronómicos.

ANEXOS

ANEXO 1. Peso seco de bulbos y total por bloques (g/maceta) en suelo arenoso.

Tratamiento	Bulbos			Total		
	I	II	III	I	II	III
U - ST - CIK - 0MO	3.7	3.3	3.2	8.8	10.6	9.8
U - ST - CIK - 0.5%MO	3.8	4.6	4.2	11.6	12.1	13.4
U - ST - SK - 0MO	4.2	4.3	3.8	12.7	11.2	11.2
U - ST - SK - 0.5%MO	5.6	5.3	4.9	13.0	16.6	16.4
U - SF24 - CIK - 0MO	3.2	3.9	3.1	8.7	10.8	8.5
U - SF24 - CIK - 0.5%MO	4.0	3.5	3.9	11.2	10.6	11.6
U - SF24 - SK - 0MO	3.5	2.9	2.0	10.4	9.3	9.7
U - SF24 - SK - 0.5%MO	3.6	4.4	4.0	13.1	14.9	12.3
SA - ST - CIK - 0MO	4.8	5.5	5.3	13.3	14.3	13.1
SA - ST - CIK - 0.5%MO	5.9	4.5	5.4	14.5	12.8	14.5
SA - ST - SK - 0MO	5.7	5.0	5.0	13.5	12.8	13.4
SA - ST - SK - 0.5%MO	4.8	4.4	4.7	14.1	13.6	14.0
SA - SF24 - CIK - 0MO	3.3	2.8	3.2	9.3	8.7	11.0
SA - SF24 - CIK - 0.5%MO	6.2	6.3	6.6	14.3	15.5	15.0
SA - SF24 - SK - 0MO	3.8	3.8	4.1	14.1	18.0	15.6
SA - SF24 - SK - 0.5%MO	5.8	4.5	5.6	15.0	15.2	16.0
0 - 0 - 0 - 0MO	0.0	0.0	0.0	2.5	2.6	2.6
0 - 0 - 0 - 0.5%MO	3.0	3.0	3.3	8.1	8.8	9.9
0 - ST - CIK - 0MO	2.9	2.5	2.9	8.0	7.0	7.8
0 - ST - CIK - 0.5%MO	1.6	2.8	3.0	6.7	7.0	7.2
U - 0 - CIK - 0MO	0.7	0.5	0.7	3.0	3.5	3.0
U - 0 - CIK - 0.5%MO	2.5	2.5	2.4	8.7	9.7	9.1
U - ST - 0 - 0MO	3.4	3.5	3.4	8.2	8.5	10.4
U - ST - 0 - 0.5%MO	4.0	4.6	4.4	12.1	12.6	12.7
U - ST - CIK - 0MO - 100ppm S	4.1	4.5	4.7	13.5	13.7	12.4
U - ST - CIK - 0.5%MO - 100ppm S	5.4	5.0	5.0	13.7	13.4	15.1

ANEXO 2. Peso seco de bulbos y total por bloques (g/maceta) en suelo franco.

Tratamiento	Bulbos			Total		
	I	II	III	I	II	III
U - ST - CIK - 0MO	14.8	13.3	15.1	35.2	32.4	33.2
U - ST - CIK - 0.5%MO	9.8	10.9	11.4	26.1	23.0	24.7
U - ST - SK - 0MO	17.2	15.3	16.1	33.4	34.5	34.1
U - ST - SK - 0.5%MO	13.0	14.1	14.3	34.6	30.3	31.7
U - SF24 - CIK - 0MO	8.3	9.1	7.5	23.8	24.6	28.7
U - SF24 - CIK - 0.5%MO	10.9	12.2	11.7	30.9	32.9	32.8
U - SF24 - SK - 0MO	9.5	11.2	9.3	27.1	26.4	26.6
U - SF24 - SK - 0.5%MO	5.4	6.3	5.7	18.2	17.2	16.8
SA - ST - CIK - 0MO	10.7	8.3	7.9	22.6	24.1	24.1
SA - ST - CIK - 0.5%MO	10.3	11.8	11.2	25.7	25.5	26.2
SA - ST - SK - 0MO	13.9	14.5	13.3	33.4	32.2	31.9
SA - ST - SK - 0.5%MO	10.0	12.3	12.2	29.2	30.6	31.4
SA - SF24 - CIK - 0MO	7.4	8.6	6.5	19.9	20.4	18.5
SA - SF24 - CIK - 0.5%MO	10.5	12.2	10.6	27.1	26.3	26.4
SA - SF24 - SK - 0MO	9.1	10.4	9.6	23.0	22.5	22.6
SA - SF24 - SK - 0.5%MO	9.4	10.3	8.7	26.1	25.5	24.9
0 - 0 - 0 - 0MO	6.5	5.9	6.2	11.4	13.9	11.6
0 - 0 - 0 - 0.5%MO	7.3	8.0	8.1	14.7	15.2	15.4
0 - ST - CIK - 0MO	8.2	8.6	7.9	17.2	17.8	17.9
0 - ST - CIK - 0.5%MO	8.3	9.6	7.8	17.7	16.4	18.0
U - 0 - CIK - 0MO	8.8	8.3	8.9	20.2	19.8	21.3
U - 0 - CIK - 0.5%MO	9.4	9.2	9.4	21.4	20.3	20.0
U - ST - 0 - 0MO	10.3	10.7	9.6	26.3	25.7	25.9
U - ST - 0 - 0.5%MO	10.5	11.4	11.1	26.7	27.1	27.9
U - ST - CIK - 0MO - 100ppm S	9.8	9.5	11.3	27.1	24.2	25.6
U - ST - CIK - 0.5%MO - 100ppm S	9.9	9.7	10.9	25.4	26.7	26.7

ANEXO 3. Rendimiento de cebolla americana por bloques (t/ha) en Arequipa durante la Campaña 1997.

N°	Tratamiento	Primera			Total		
		I	II	III	I	II	III
1	U - ST - CIK	49.0	29.3	40.3	78.0	43.8	50.8
2	U - ST - SK	47.3	31.5	38.5	71.8	50.8	47.3
3	U - SF-24 - CIK	47.3	50.8	43.8	63.0	54.3	61.3
4	U - SF24 - SK	54.3	61.3	42.0	71.8	77.0	57.8
5	SA - ST - CIK	49.0	42.0	43.8	63.0	56.0	56.0
6	SA - ST - SK	35.0	57.8	36.8	49.0	73.5	61.3
7	SA - SF-24 - CIK	49.0	54.3	63.0	57.8	66.5	66.5
8	SA - SF24 - SK	61.3	59.5	63.0	64.8	73.5	70.0
9	0 - 0 - 0	21.0	24.5	24.5	33.3	36.8	42.0
10	0 - ST - SK	24.5	29.8	33.3	40.3	49.0	40.3
11	U - 0 - SK	26.3	35.0	38.5	48.0	47.3	47.3
12	SA - ST - 0	40.3	43.8	40.3	54.3	49.0	50.8

ANEXO 4. Rendimiento de papa por bloques (t/ha) en Arequipa durante la Campaña 1997.

N°	Tratamiento	Primera			Total		
		I	II	III	I	II	III
1	U - ST - CIK	16.0	12.0	18.0	35.0	31.0	29.0
2	U - ST - SK	20.0	18.0	19.0	40.0	33.0	34.0
3	U - SF-24 - CIK	15.0	12.0	10.0	32.0	30.0	26.0
4	U - SF24 - SK	16.0	17.0	16.0	29.0	33.0	31.0
5	SA - ST - CIK	14.0	16.0	19.0	32.0	33.0	33.0
6	SA - ST - SK	18.0	21.0	17.0	29.0	36.0	34.0
7	SA - SF-24 - CIK	15.0	11.0	15.0	28.0	27.0	37.0
8	SA - SF24 - SK	12.0	21.0	17.0	27.0	33.0	39.0
9	0 - 0 - 0	7.0	4.0	8.0	13.0	18.0	19.0
10	0 - ST - SK	10.0	13.0	9.0	20.0	22.0	16.0
11	U - 0 - SK	11.0	15.0	13.0	21.0	25.0	25.0
12	SA - ST - 0	16.0	17.0	15.0	28.0	24.0	27.0

ANEXO 5. Acumulación de azufre en bulbos de cebolla.

	Tratamiento	% S suelo franco	%S suelo arenoso
1	U- ST -CIK -0MO	0.21	0.18
2	U- ST -CIK -0.5%MO	0.23	0.19
3	U- ST -SK -0MO	0.23	0.20
4	U-SF-24- CIK -0MO	0.17	0.16
5	SA- ST -CIK -0MO	0.23	0.19
6	U - ST -CIK -0MO - 100 ppm S	0.20	0.17

ANEXO 6. ANVA en suelo arenoso - peso seco total cebolla

Fuente	gl	Sum. Cuad.	Cuad. Medio	Valor F	Prob.
Repetición	2	3,188	1,594	1.46	0.25
Factor A	1	58,742	58,742	53.69	0
Factor B	1	3,255	3,255	2.98	0.09
AB	1	8,417	8,417	7.69	0.01
Factor C	1	36,925	36,925	33.75	0
AC	1	0,350	0,350	0.32	
BC	1	4,502	4,502	4.11	0.05
ABC	1	15,985	15,985	14.61	0
Factor D	1	57,422	57,422	52.48	0
AD	1	6,527	6,527	5.97	0.02
BD	1	1,577	1,577	1.44	0.24
ABD	1	3,910	3,910	3.57	0.07
CD	1	1,300	1,300	1.19	0.28
ACD	1	12,917	12,917	11.81	0
BCD	1	5,135	5,135	4.69	0.04
ABCD	1	8,927	8,927	8.16	0.01
Error	30	32,825	32,825		
TOTAL	47	261,905			

ANEXO 7. ANVA en suelo franco - peso seco total cebolla

Fuente	gl	Sum. Cuad.	Cuad. Medio	Valor F	Prob.
Repetición	2	2,161	1,081	0.75	
Factor A	1	72,767	72,767	50.30	0
Factor B	1	304,517	304,517	210.50	0
AB	1	3,797	3,797	2.62	0.12
Factor C	1	17,642	17,642	12.20	0
AC	1	85,067	85,067	58.80	0
BC	1	207,917	207,917	143.73	0
ABC	1	19,892	19,892	13.75	0
Factor D	1	2,567	2,567	1.77	0.19
AD	1	103,547	103,547	71.58	0
BD	1	58,742	58,742	40.61	0
ABD	1	0,542	0,542	0.37	
CD	1	54,827	54,827	37.90	0
ACD	1	0,002	0,002	0	
BCD	1	98,327	98,327	67.97	0
ABCD	1	100,052	100,052	69.16	0
Error	30	43,399	43,399		
TOTAL	47	1,175,763			

ANEXO 8. ANVA en suelo de arequipa cultivo de cebolla

Fuente	gl	Sum. Cuad.	Cuad. Medio	Valor F	Prob.
Repetición	2	145.21	72.60	0.67	
Factor A	1	38.00	38.00	0.35	0.13
Factor B	1	287.00	287.00	2.64	
AB	1	0.24	0.24	0.00	0.33
Factor C	1	110.94	110.94	1.02	
AC	1	0.04	0.04	0.00	
BC	1	64.68	64.68	0.60	
ABC	1	20.17	20.17	0.19	
Error	14	1,520.12	108.58		
TOTAL	23	2,186.44			

ANEXO 9. ANVA en suelo de arequipa cultivo de papa

Fuente	gl	Sum. Cuad.	Cuad. Medio	Valor F	Prob.
Repetición	2	7.75	3.88	0.29	
Factor A	1	1.04	1.04	0.06	
Factor B	1	30.38	30.38	1.89	0.19
AB	1	9.38	9.38	0.38	
Factor C	1	26.04	26.04	1.62	0.22
AC	1	3.38	3.38	0.21	
BC	1	0.04	0.04	0.00	
ABC	1	7.04	7.04	0.44	
Error	14	225.58	16.11		
TOTAL	23	310.63			